



Coordenação de Apoio Técnico às Micro e Pequenas Empresas - CATE
Centro de Tecnologia Mineral - CETEM
Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI

BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Leonardo L. L. Silveira
Pesquisador

Francisco Wilson Hollanda Vidal
Tecnologista Sênior.

Júlio César Souza
Eng. de Minas, Dsc. UFPE

Rio de Janeiro, junho de 2014

**CCL-0005-00-14 CAPÍTULO DO LIVRO TECNOLOGIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS:
PESQUISA, LAVRA E BENEFICIAMENTO. Vidal, F.V.; Azevedo, H.C.A.; Castro, N. F. Rio de
Janeiro: CETEM/MCTI. ISBN: 987-85– 8261-005-3. p 327 - 398**

TECNOLOGIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Pesquisa, Lavra e Beneficiamento

EDITORES

**Francisco W. H. Vidal,
Hélio C. A. Azevedo e
Nuria F. Castro**

CETEM
CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

CETEM/MCTI
Rio de Janeiro/2014

TECNOLOGIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS: PESQUISA, LAVRA E BENEFICIAMENTO

Editores:

Francisco Wilson Hollanda Vidal - CETEM/MCTI
Nuria Fernández Castro - CETEM/MCTI
Helio Carvalho Antunes de Azevedo - CBPM

Autores:

Adriano Caranassios - CETEM/MCTI (*In Memoriam*)
Angêlica Batista Lima - CPRM/MME
Antônio Rodrigues de Campos - CETEM/MCTI
Carlos César Peiter - CETEM/MCTI
Carlos Rubens Araujo de Alencar - HEAD Participações
Cid Chiodi Filho - ABIROCHAS
Denise Kistemann Chiodi - KISTEMAN&CHIODI Assessoria e Projetos
Eunice Freitas Lima - CETEM/MCTI
Francisco Wilson Hollanda Vidal - CETEM/MCTI
Helio Carvalho Antunes de Azevedo - CBPM
Ilson Sandrini - Consultor
José Roberto Pinheiro - ALVORADA Mineração Comércio e Exportação Ltda.
Júlio Cesar Souza - UFPE
Leonardo Cattabriga - CETEM/MCTI
Leonardo Luiz Lyrio da Silveira - CETEM/MCTI
Luciana Marelli Mofati - CETEM/MCTI
Marcos Nunes Marques - UNIMINAS
Maria Heloísa Barros de Oliveira Frascá - MHB Serviços Geológicos Ltda.
Nuria Fernández Castro - CETEM/MCTI
Roberto Carlos da Conceição Ribeiro - CETEM/MCTI
Roberto Cerrini Villas-Bôas - CETEM/MCTI
Ronaldo Simões Lopes de Azambuja - CETEM/MCTI (*In Memoriam*)
Rosana Elisa Coppedê da Silva - CETEM/MCTI
Vanildo Almeida Mendes - CPRM/MME

Colaboradores:

Abiliane de Andrade Pazeto, Ana Cristina Franco Magalhães, Arquiteto Paulo Barral, Arquiteto Renato Paldés, Carolina Nascimento Oliveira, Davi Souza Vargas, Diego Amador Rodrigues, Douglas Bortolote Marcon, Eder Ferreira Framil, Eduardo Coelho, Eduardo Pagani, Gilson Ezequiel Ferreira, Hieres Vetorazzi, Hudson Duarte, Isabela Rigão, Jefferson Camargo, Julio César Guedes Correia, Marcelo Taylor de Lima, Marcione Ribeiro, Michelle Pereira Babisk, Ronaldo Frizzera Matos, Thiago Bolonini, Victor Ponciano.

Capa: Bruno Dias Ferreira, Roger Ferreira de Lima, Ananda Menali Menezes Rodrigues

Desenhos: Cassiane Santos Tofano, Nuria Castro

Revisão Português: Danielle da Conceição Ribeiro, Verônica Bareicha

Projeto gráfico/Editoração eletrônica: Vera Lúcia do Espírito Santo, Thiene Pereira Alves

Revisão: Carlos Rubens de Alencar

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

Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento/Eds. Francisco W. H.

Vidal, Hélio C. A. Azevedo, Nuria F. Castro - Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013.

700p.: il.

1. Rochas ornamentais. II. Beneficiamento de minério. I. Centro de tecnologia Mineral.
II. Vidal, Francisco W. H. (Ed.). III. Azevedo, Hélio C. A. (Ed.). IV. Castro, Nuria F. (Ed.)

ISBN 987-85-8261-005-3

CDD 553

Agradecimentos

ANPO, Andreia Batista Teixeira, Antonio Augusto Pereira Souza (Fuji Granitos), Associação Ambiental Monte Líbano, Alvorada Mineração, Bruno Zanet, Cetemag, Comil Cotaxé Mineração, Decolores Mármore e Granitos, Emanuel Castro (Revista Rochas), Elzivir Guerra (SGM/MME), Enir Sebastião Mendes (SGM/MME), Fernando Vidal, Flamart Acabamentos do Brasil Ltda., Flávia Karina Rangel de Godoi, Flávio José Silva, Fundisa, IEMA, Granfaccin Granitos, Granitos Collodetti, Granitos Zucchi, Ivar Costa, Luiz Zampirolli, Marbrasa Mármore e Granitos, Mauro Varejão, Mineração Corcovado, Mineração Guidoni, Mineração Pagani, Mineração Santa Clara, Mineração Vale das Rochas, Nilza Hagai, Olívia Tirello (Centrorochas), Pedra Mosaico Português Cesar, Pedra Rio, Pemagran, Phillipe Fernandes de Almeida, Prefeitura Municipal de Cachoeiro de Itapemirim, Regina Martins, Rossittis Brasil S.A., Sindirochas, Tracomal Mineração, Volpi equipamentos.

Dedicatória “*in memoriam*”

Nossa eterna gratidão e reconhecimento aos colegas que não chegaram a ver esta obra concluída, mas que em muito contribuíram com a sua elaboração e com o legado nela impresso:

Gildo Sá Cavalcanti de Albuquerque

Adriano Caranassios

Ronaldo Simões Lopes de Azambuja

ESTE LIVRO FOI FINANCIADO POR

Secretaria de
Geologia, Mineração e
Transformação Mineral

Ministerio de
Minas e Energia

Sumário

Agradecimentos	
Dedicatória	
Apresentação	
Prefácio	
Prólogo	
Sumário	
Capítulo 1: Introdução	15
Capítulo 2: Tipos de rochas ornamentais e características tecnológicas	43
Capítulo 3: Pesquisa de rochas ornamentais	99
Capítulo 4: Lavra de rochas ornamentais	153
Capítulo 5: Aspectos legais das rochas ornamentais	259
Capítulo 6: Plano de aproveitamento econômico de rochas ornamentais	285
Capítulo 7: Beneficiamento de rochas ornamentais	327
Capítulo 8: Saúde e segurança no trabalho	399
Capítulo 9: Resíduos - tratamento e aplicações industriais	433
Capítulo 10: O setor de rochas ornamentais no Brasil	493
Capítulo 11: A busca da sustentabilidade na produção e uso das rochas ornamentais	529
Anexo	567
Glossário e dicionário	587

NUNES MARQUES, Marcos. Relatórios de Serviços de Lavra de Granito Ornamental. Relatórios res-
tritos da Pedreira Escola. Ruy Barbosa. Bahia. 2004.

QUÍMICA EDILE DO BRASIL Manual de Utilização do Fract. Ag: argamassa expansiva. Cachoeiro
de Itapemirim, ES, 2000.

RODRIGUES COSTA, Roberto. Projetos de Mineração. Universidade Federal de Ouro Preto: Ouro
Preto, Minas Gerais. 1979.

SANDVICK DO BRASIL Manual de Perfuração de Rochas. São Paulo, 1996.

SOUZA, Hélio; CARALANI, Guilherme. Terraplanagem e Escavações em Rochas. São Paulo: Ed.
MacGraw Hill do Brasil, 1977.

SOUZA, Petain A. Avaliação econômica de projetos de mineração: análise de sensibilidade e análise
de risco / Edição Revisada. Petain Ávila de Souza- Belo Horizonte. 2005

TEODORO, Wilder; RUBIO, Galvão. Segurança na Mineração em Uso de Explosivos. Rio de Janeiro:
Fundacentro, 1986.

Capítulo 7

Beneficiamento de rochas ornamentais

*Leonardo Luiz Lyrio da Silveira, Geólogo, D.Sc., CETEM/MCTI
Francisco Wilson Hollanda Vidal, Eng. de Minas, D.Sc., CETEM/MCTI
Julio César Souza, Eng. de Minas, D.Sc., UFPE*

1. Introdução

O beneficiamento de rochas ornamentais visa basicamente a transformação dos blocos, extraídos na fase de lavra, em produtos finais ou semiacabados. Desta forma, podem se separar as fases de beneficiamento em primário, ou desdobramento, e secundário. O primeiro compreende a preparação e serragem dos blocos em chapas de espessura variável, usualmente dois ou três centímetros. No segundo processo, as chapas são submetidas a acabamento superficial, com ou sem resinação, que pode ser um simples desbaste, polimento, escovado, flameado ou outros tipos que serão vistos neste capítulo, assim como a produção de ladrilhos e outras peças.

A compreensão das etapas de beneficiamento de rochas ornamentais, mais especificamente a serragem e o polimento, como sendo processos de desgaste de uma superfície em que existe uma íntima relação entre as muitas variáveis envolvidas, ainda não é completa. As características intrínsecas da rocha, os tipos de teares (multifio e multilâmina), talha-blocos, serras diamantadas e politrizes (automáticas e semiautomáticas), os tipos e formas de abrasivos são alguns dos fatores que influem no produto final e que são colocados, na maioria dos casos, em segundo plano.

Especificamente no setor de rochas ornamentais, o Brasil, apesar de ter apresentado uma significativa melhora na qualidade operacional de seus parques industriais, principalmente em relação às técnicas de beneficiamento primário (desdobramento) e secundário (polimento), ainda não tem atentado para a importância de desenvolver, de uma forma mais intensa, pesquisas nesse importante setor produtivo. Em todo o processo de beneficiamento de rocha ornamental, existem lacunas no conhecimento que, em última análise, geram custos, contribuindo para uma diminuição da competitividade da indústria brasileira no mercado internacional.

A importância do atrito e da resistência ao movimento é reconhecida em vários exemplos práticos no nosso dia a dia e ao longo da História da nossa civilização. Registros do antigo Egito mostram serviços de transporte de objetos pesados que envolviam desde o simples arrasto até a utilização de toras ou rolos. Para arrastar os blocos de várias toneladas que usavam em suas construções, os egípcios valiam-se dessas ferramentas simples para diminuir, de maneira ainda instintiva, o coeficiente de atrito entre as superfícies.

Em muitos setores das atividades humanas o desgaste é um fator indesejável, pois pode causar perda da vida útil de algum componente, perda de desempenho etc. No caso do processamento industrial de rochas ornamentais, entretanto, é o desgaste que imprime a qualidade da superfície serrada, o brilho, a beleza e a durabilidade das rochas polidas. Logo, é de suma importância a compreensão dos processos de atrito e desgaste envolvidos nesses processos e a definição de um modelo tribológico, em que seja possível a definição de taxas de desgaste, sendo considerados todos os atributos intervenientes.

O termo Tribologia pode ser definido como a “Ciência e tecnologia de superfícies que se interagem em movimento relativo ao das práticas a elas relacionadas” (ZUM-GAHR, 1987). O atrito e o desgaste não são propriedades intrínsecas dos materiais, mas sim características da interação destes materiais com variáveis operacionais. O atrito é responsável por dissipações de energia, e o desgaste de matéria. Atrito é a resistência ao deslocamento gerado a partir da interação de sólidos em determinadas áreas de contato e desgaste é a perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido devido ao contato e movimento relativo deste com outro corpo sólido, líquido ou gasoso.

A resistência ao desgaste é considerada como parte de um sistema tribológico, sendo muitos os parâmetros que acabam por influir na taxa de desgaste, incluindo as características do projeto,

condições de operação, tipo de abrasivo e propriedades do material. De acordo com a *American Society of Metals - ASM* (2001), os fatores que mais influem em um sistema tribológico são:

- Composição dos materiais;
- acabamento da superfície de cada sólido;
- natureza das condições de contorno;
- carga aplicada;
- velocidade relativa entre os corpos;
- natureza do movimento entre os corpos (unidirecional, para trás e para frente etc.);
- natureza do contato;
- temperatura da região interfacial; e
- características da máquina a ser utilizada.

Esta Ciência, com modelos analíticos originalmente desenvolvidos para previsão de taxas de desgaste ideais para processos de usinagem metálica, pode contribuir para um melhor entendimento dos processos de beneficiamento de rochas ornamentais. Em alguns aspectos, principalmente em relação à composição e comportamento mecânico, os metais diferem dos elementos minerais que compõem as rochas. Porém, em relação à contribuição ao comportamento dos mesmos nos seus distintos processos de beneficiamento, fatores como o arranjo, textura, estrutura e granulação dos elementos constituintes guardam similaridade quanto ao seu grau de importância no resultado final. Comparando uma microfotografia de rocha em lâmina delgada (Fig. 1) com outra de uma liga metálica (Fig. 2), tais aspectos em comum podem ser verificados.

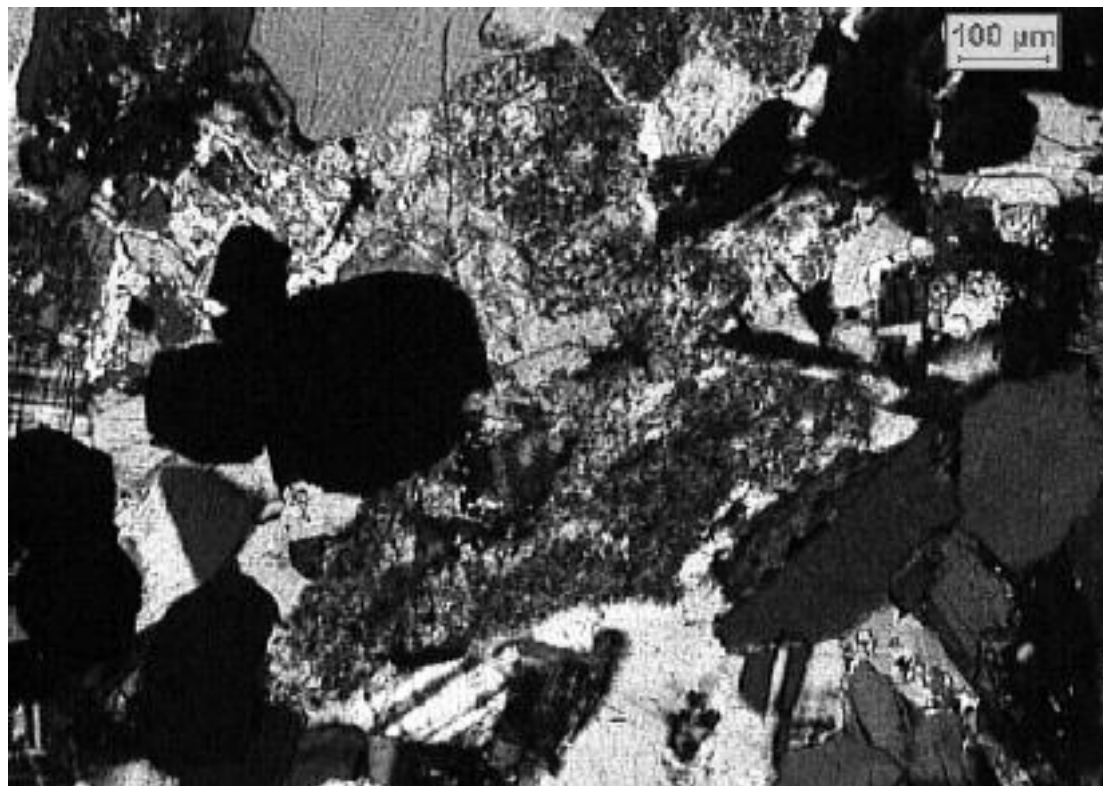


Figura 1 - Fotomicrografia de um monzogranito com textura fina. Extraído de Silveira, 2007.

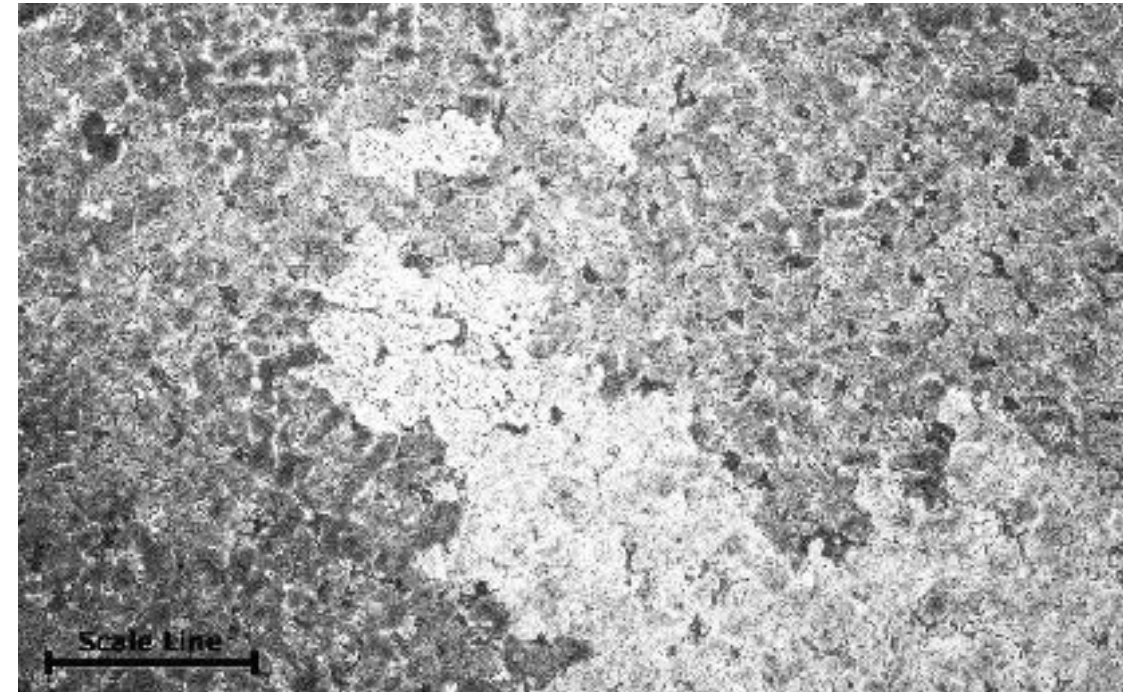


Figura 2 - Fotomicrografia de uma liga de Cobre-Titânio, escala gráfica de 125 µm. Extraído de *Copper Development Association Inc.*, 2013.

2. Mecanismos de desgaste nas etapas de beneficiamento

Existem numerosas classificações de processos de desgaste. Uma característica em comum entre todas elas é o uso do mecanismo para definir o processo de desgaste. Noble (1985) caracteriza quatro tipos principais de desgaste, a saber:

- desgaste abrasivo (abrasão);
- desgaste por deslizamento;
- desgaste erosivo (erosão); e
- desgaste por atrito acelerado devido a vibrações diferenciais na zona interfacial (*fretting*).

O desgaste por abrasão caracteriza-se por movimento relativo entre um corpo “duro” e uma superfície mais “mole”. Neste processo, o corpo duro pode ser fraturado e a superfície mais mole pode ser trincada e/ou deformada, sendo tais materiais removidos da superfície, resultando mensurável perda de volume. O desgaste abrasivo pode, por sua vez, ser dividido em relação ao tipo de contato, que pode ser a dois ou a três corpos. O primeiro ocorre quando um abrasivo desliza ao longo de uma superfície (ex. polimento), e o segundo quando um abrasivo desliza entre duas superfícies (ex. serragem). A figura 3 mostra, de forma esquemática, os dois tipos de processos abrasivos em relação ao contato.

O beneficiamento de uma peça com abrasivo preso ao rebolo (abrasão a dois corpos) é muito diferente do processo que utiliza abrasivos soltos (abrasão a três corpos). Uma superfície gerada por desgaste abrasivo a dois corpos é mais lisa do que uma gerada por abrasivos livres. Comparada com os abrasivos livres, a rugosidade média (Ra) obtida por processo a dois corpos é de 1/5 a 1/10 (Fig. 4).

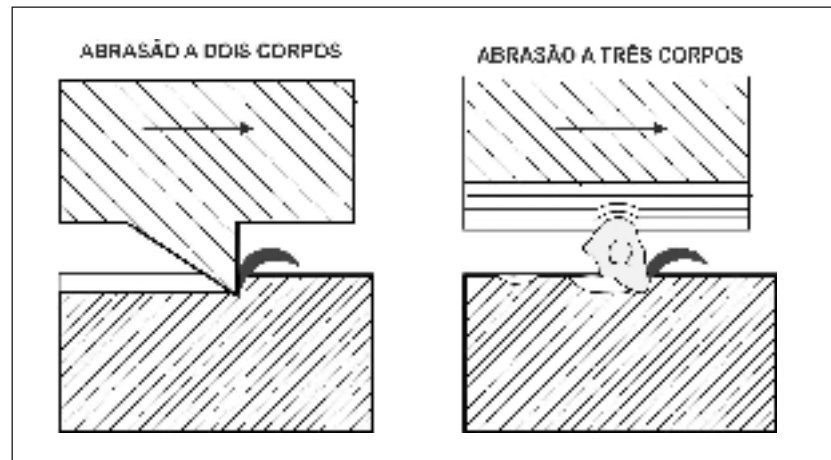


Figura 3 - Esquema de desgaste a dois e a três corpos. Extraído de Zum-Gahr, 1987.

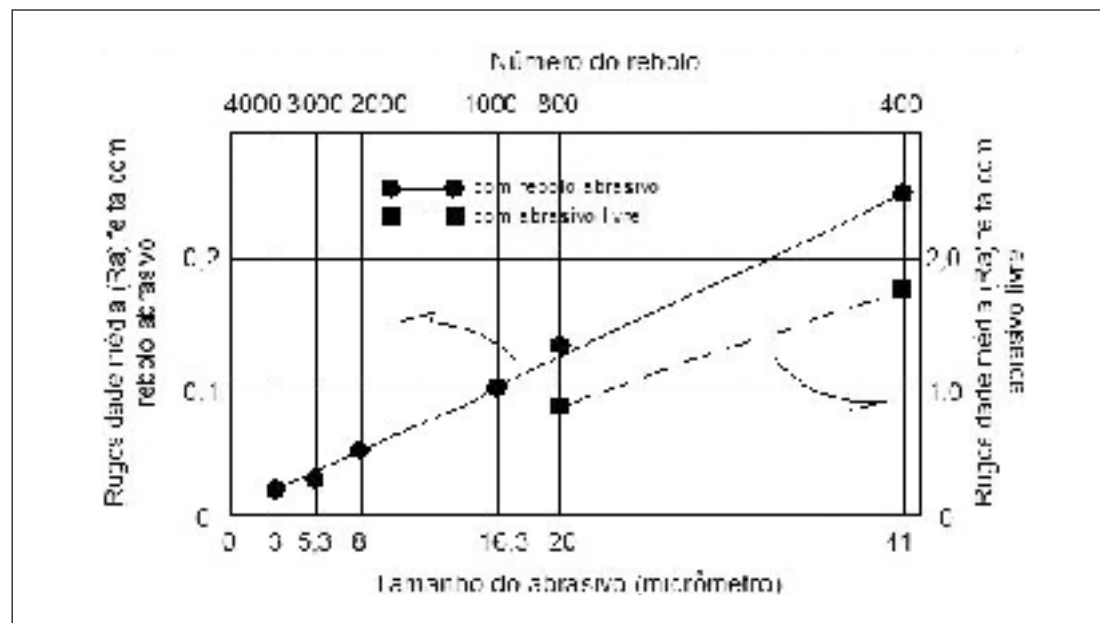


Figura 4 - Relação entre o tamanho do abrasivo, tipo de desgaste e rugosidade média. Extraído de Tomita e Eda, 1996.

O desgaste abrasivo pode também ser dividido em relação ao carregamento (tensão) em que o sistema se apresenta, a saber:

- Abrasão por riscamento – também conhecido como abrasão em baixas tensões, este tipo se dá por contato da superfície com partículas abrasivas, em que, devido à baixa tensão envolvida, não ocorre fragmentação do abrasivo. As tensões causadas são devidas, principalmente, à velocidade relativa entre os corpos (velocidade de corte); e
- abrasão por goivamento – devido às altas tensões envolvidas neste processo, o goivamento envolve a remoção de partículas relativamente grosseiras da superfície do corpo. Este tipo de desgaste envolve a fragmentação das partículas abrasivas e remoção de grande quantidade de material da peça de trabalho.

2.1. Principais fatores que influem na abrasividade

De acordo com Momber e Kovacevic (1998), a avaliação de um material para ser usado como abrasivo deve envolver a caracterização dos seguintes parâmetros:

- Estrutura do material;
- dureza do material;
- comportamento mecânico;
- forma do grão;
- distribuição granulométrica; e
- tamanho médio dos grãos.

Agus *et al.* (1995) introduziu um parâmetro para a avaliação do material abrasivo:

$$P_{Abr} = H_p \cdot S \cdot \rho_p \cdot d_p \cdot m_A$$

Onde:

- Hp – dureza do material abrasivo;
- S – forma da partícula;
- rp – peso específico do material;
- d_p – diâmetro da partícula;
- m_a – taxa de fluxo de massa.

Dureza

A dureza é a resistência que determinada superfície oferece ao risco, sendo esta considerada como uma das propriedades mais importantes do material que sofre desgaste. Cabe salientar que, quando se fala de dureza, pode tratar-se tanto do abrasivo quanto do material a ser desgastado.

Como as outras propriedades físicas dos minerais, a dureza depende da estrutura atômica dos mesmos. Quanto mais forte for a união entre os átomos, mais duro será o material. A dureza pode ser quantificada por vários métodos. Um dos mais utilizados para medir a dureza de materiais, principalmente ligas e metais, são os ensaios de Rockwell, normatizados pela *American Society for Testing and Materials* – ASTM - E 18 (2008). Este ensaio ocorre quando um penetrador esférico e duro é forçado contra a superfície do metal a ser testado. O diâmetro do penetrador de aço endurecido (ou Carbetto de Tungstênio) é de 10,00 mm (0,394”). As cargas padrão variam de 500 a 3000 kg em incrementos de 500 kg; durante o ensaio, a carga é mantida constante por um tempo específico (entre 10 e 30 segundos). Materiais mais duros exigem cargas aplicadas maiores. O índice de dureza Brinell, HB, é uma função tanto da magnitude da carga quanto como do diâmetro da impressão resultante.

Em rocha, uma técnica que vem sendo cada vez mais utilizada é a determinação da dureza por microindentação, também chamada de microdureza, regida pela norma ASTM E 384 (2011). Existem dois tipos principais de pontas de diamante, que são adotadas em função do tipo de material em que será efetuado o ensaio. A ponta *Vickers* não apresenta um bom resultado em materiais não maleáveis, como vidro, cerâmica e minerais não metálicos (grande maioria dos minerais encontrados em rochas ornamentais). Pesquisas do setor ceramista mostraram que a determinação da dureza *Knoop* apresentava uma menor dispersão do que as medidas de dureza *Vickers*, para os mesmos materiais.

Tamanho das Partículas

De modo geral, quanto maior o tamanho da partícula maior a taxa de desgaste. Isto é devido a uma remoção mais eficiente de material face a maior carga exercida por cada partícula de abrasivo quando, sob as mesmas condições de ensaio, o tamanho desta é aumentado.

A taxa de remoção de material apresenta uma relação constante com abrasivos até o rebolo com granulometria 15 mm (800 mesh). A partir deste ponto, ocorre uma grande diminuição na taxa de remoção (Fig. 5).

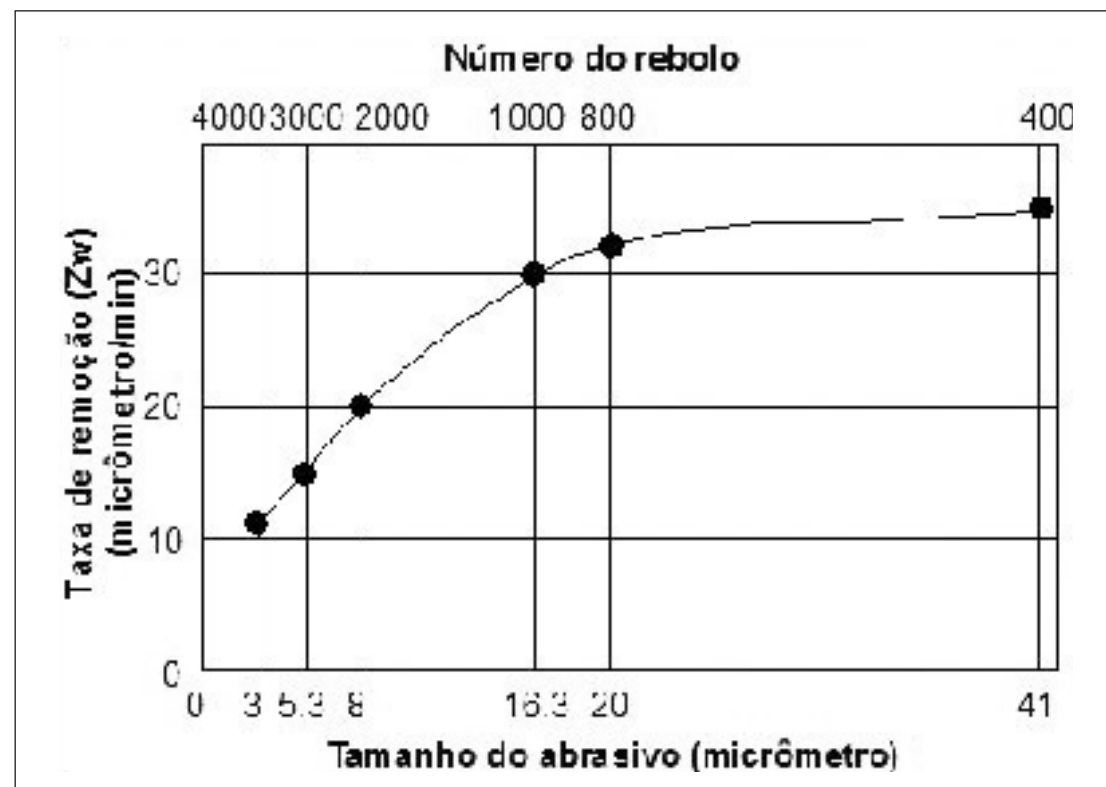


Figura 5 - Relação entre tamanho do grão abrasivo e taxa de remoção. Extraído de Tomita e Eda, 1996.

Tomita e Eda (1996) estudaram também a relação entre a rugosidade máxima (Rmax) e o tamanho do grão abrasivo. Tal parâmetro apresentou-se constante ao longo de todo o processo de polimento (Fig. 6). Algumas equações foram desenvolvidas, a partir dos dados por eles apresentados, relacionando rugosidade média (Ra), taxa de remoção (Zw) e tamanho do grão abrasivo (D) e são apresentadas a seguir:

$$R_a = 0.006D + 0.002$$

$$Z_w = 1.8D + 5.6$$

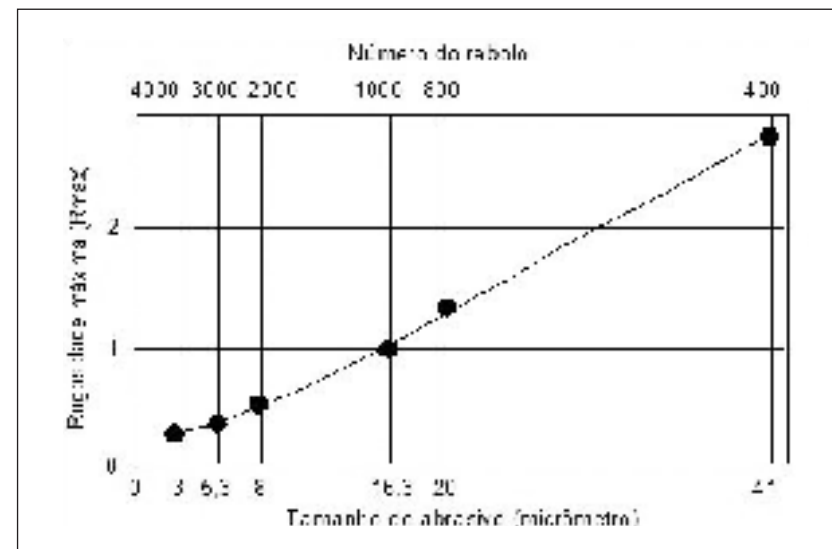


Figura 6 - Relação entre tamanho do abrasivo e rugosidade máxima (Rmax). Extraído de Tomita e Eda, 1996.

Durante a abrasão, o tamanho das partículas pode variar em função das solicitações imperantes no sistema (Fig. 7). Partículas muito duras e frágeis tendem a diminuir de tamanho, reduzindo-se também o seu poder de desgaste. Partículas com alta tenacidade podem gerar arestas de corte arredondadas e deixar de remover material por microcorte; e partículas com propriedades intermediárias, duras, porém não tão frágeis, podem ter arestas de corte renováveis durante seus movimentos, permitindo um desgaste rápido do material em contato (STACHOWIAK; BATCHELOR, 1993).

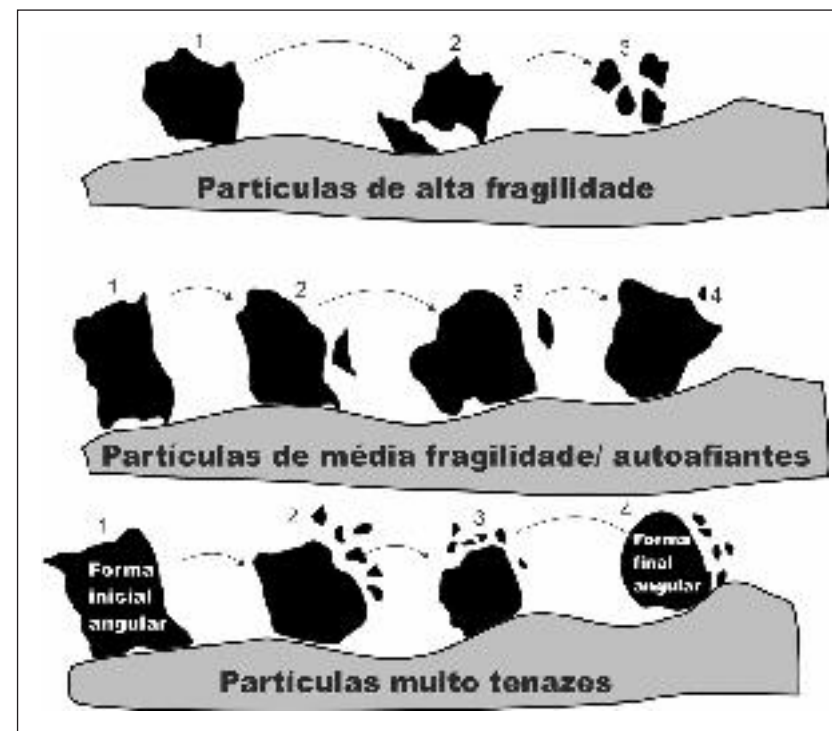


Figura 7 - Efeito da tenacidade e da fragilidade da partícula sobre sua eficiência em desgastar. Extraído de Stachowiak e Batchelor, 1993.

O conceito oposto ao da tenacidade é o de friabilidade, que corresponde à facilidade para se romper um material sob uma determinada força ou impacto.

A friabilidade define bem uma classificação dos abrasivos: materiais de maior friabilidade são utilizados em operações de retífica e de polimento (ex.: carbetos de silício e alumina eletrofundida branca), já os materiais menos friáveis (ex.: alumina eletrofundida marrom) são utilizados em operações envolvendo grande volume de material a ser removido (MORAIS; SUSTER, 2001).

Em relação a característica de tenacidade do rebolo abrasivo relacionado com o processo de polimento de rochas ornamentais, Scognamiglio (1995) lembra que tal fator é importante, porém, não o único atributo que deve ser considerado. Segundo o autor, ao utilizar abrasivos muito tenazes, a pressão usual de trabalho da politriz será ineficiente e, no intuito de torná-lo produtivo, pode-se aumentar gradualmente a pressão de trabalho do equipamento, o que acarreta distanciamento dos padrões normais da máquina, podendo gerar vários problemas, pois com o aumento da pressão de trabalho:

- Aumenta a amperagem dos motores;
- cresce o consumo de energia elétrica;
- chapas e abrasivos começam a se romper mais frequentemente;
- aumenta substancialmente o número de riscos na chapa;
- ladrilhos de 1 cm de espessura não resistem a altas pressões;
- motores elétricos passam a trabalhar em regime de sobrecarga e, por conseguinte, vão aquecer e queimar mais frequentemente; e
- cabeçotes terão uma redução drástica de sua vida útil devido aos excessivos esforços sobre os rolamentos, provocando também superaquecimento e fuga de graxa.

Este autor ressalta ainda que o princípio do trabalho do abrasivo não é o da pressão e sim o da diferença de dureza entre seu componente básico, o Carbetos de Silício (SiC) ou diamante (C), durezas 9,5 e 10,0 respectivamente, na escala de *Mohs* – e a rocha ornamental que, mesmo as mais duras, não ultrapassam o índice 7 na mesma escala. Deve-se então estabelecer uma faixa de pressão de trabalho entre 1 bar e, no máximo, 2 bars (1bar=0,987 atm ou 1kgf/cm²). Se algum abrasivo necessitar de pressão superior a 2 bars para se tornar produtivo, convém também considerar os fatores negativos que advêm desta pressão.

Velocidade Relativa e Carga Aplicada

A influência da carga aplicada e da velocidade relativa entre as partículas abrasivas e o material que sofre desgaste despertou interesse logo nos primeiros estudos de desgaste por abrasão.

Um dos primeiros trabalhos acerca deste assunto foi o de Haworth (1949). Este autor, ensaiando amostras temperadas de aço SAE 1045, variou a carga e a velocidade da roda de borracha. Foi possível observar que a mudança na velocidade de 250 rpm para 1.035 rpm, mantendo-se constantes os outros parâmetros, gerou um aumento de, aproximadamente, duas vezes na taxa de perda de massa; enquanto que, dobrando-se a carga e mantendo a velocidade constante a 250 rpm, ampliou-se o valor da taxa de desgaste do abrasivo em duas vezes e meia.

Temperatura

O aumento da temperatura, geralmente, causa uma diminuição na dureza do material. Por este motivo, é de se esperar que a temperatura influa na resistência ao desgaste dos materiais (TYL-CZAK, 1992). Apesar disto, poucos trabalhos têm sido realizados para quantificar o efeito da tem-

peratura na abrasão, pois muitas dificuldades são encontradas pelos laboratórios para adaptar os equipamentos de tal forma que permitam a realização de ensaios a temperaturas controladas.

2.2. Modelos analíticos do processo abrasivo

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 que tentou 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 (1959) *Apud* Tylczak (1992), expressa pela seguinte equação:

$$W = K.F_N.S / H$$

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

Rabinowicz (1965) *apud* Stachowiak e Batchelor (1993) criaram um modelo cujo desgaste abrasivo é quantificado considerando uma única partícula abrasiva, de forma cônica, sendo arrastada sobre uma superfície produzindo uma ranhura uniforme (Fig. 8). De acordo com este modelo, o volume de material removido (W) é o produto entre a área da seção transversal do sulco produzido, ($d^2.cot\alpha$) e a distância percorrida pelo indentador cônico (l).

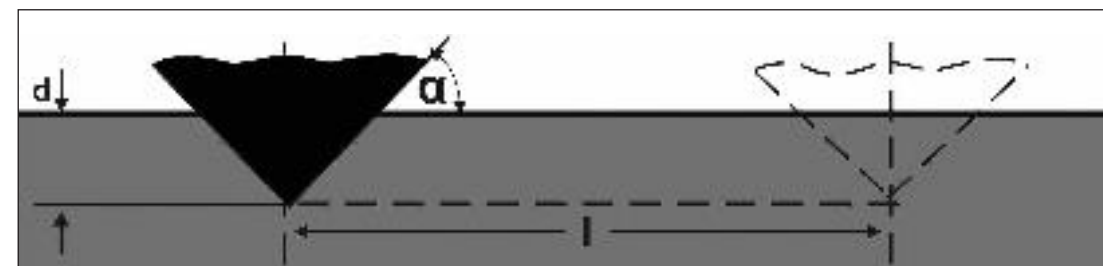


Figura 8 - Modelo de desgaste abrasivo causado por uma única partícula. Extraído de Stachowiak e Batchelor, 1993.

$$W = d^2.cot\alpha.S$$

Onde:

W – volume de material removido;

d – profundidade da indentação;

α – ângulo do cone; e

S – distância percorrida pelo indentador cônico.

3. Processos de beneficiamento primário

O beneficiamento primário também é conhecido como serragem ou desdobramento e consiste no corte dos blocos em chapas com espessuras bastante próximas do produto acabado. Isso é feito com uso de equipamentos como teares multilâmina, tear monolâmina, talha-blocos de disco diamantado, teares multifio diamantados ou monofio diamantado.

No beneficiamento secundário, ou final, são obtidos os diversos produtos a serem consumidos pelo setor de aplicação de rochas ornamentais nas suas diversas modalidades. Os processos envolvidos são de grande diversidade e variada complexidade, envolvendo o tratamento superficial, que representa a fase na qual as chapas brutas são polidas, apicoadas ou flameadas e transformando-as em chapas acabadas. Os principais grupos de produtos obtidos a partir do processamento de mármore e granitos para aplicação na indústria da construção civil são:

- Painéis para revestimento externo;
- ladrilhos para pavimentação;
- ladrilhos para revestimento;
- degraus e parapeitos;
- meios-fios, molduras e rodapés;
- mesas e bancadas para decoração;
- colunas; e
- produtos especiais.

3.1. Envelopamento de blocos

Na preparação do bloco para a etapa de serragem, independente da tecnologia utilizada, eventualmente é feito o envelopamento do mesmo com resinas especiais, por tratar de materiais com trincas acentuadas, geralmente, tipos considerados exóticos no mercado das rochas ornamentais. A figura 9 mostra um bloco em processo de envelopamento e a figura 10 o bloco já envelopado e preparado para a serragem.



Figura 9 - Processo de envelopamento de bloco de rocha ornamental. Foto: CETEM/MCTI, 2011.



Figura 10 - Bloco envelopado e preparado para serragem. Foto: CETEM/MCTI, 2011.

3.2. Desdobramento de blocos

O desdobramento dos blocos de mármore, granito e rochas afins em geral é processado essencialmente por teares multilâmina (também denominados de convencionais) ou multifio, e secundariamente, por talha-blocos e teares diamantados. Nos últimos anos, tem havido um crescimento acentuado no parque tecnológico brasileiro para os teares multifio. Nessa etapa, os blocos são serrados em chapas, tiras ou espessores, com espessuras bastante próximas daquelas que terão os produtos finais. A figura 11 apresenta de forma esquemática os principais equipamentos e layout de uma unidade de beneficiamento de blocos de rocha ornamental.

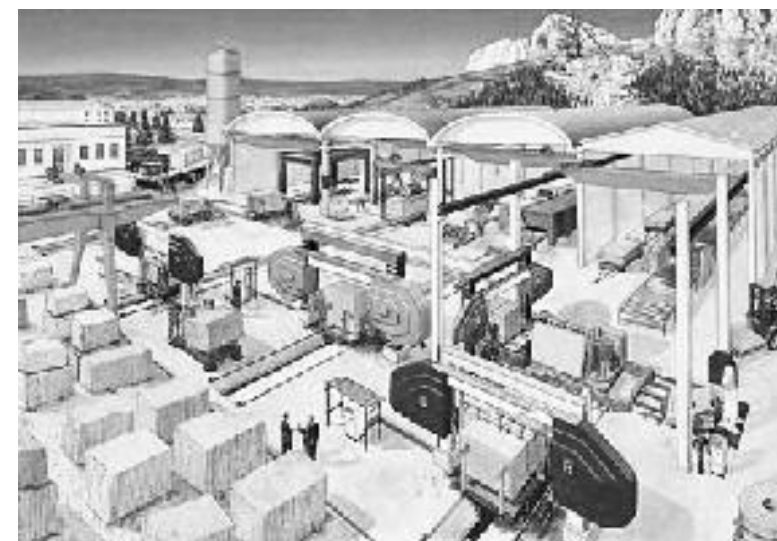


Figura 11 - Layout de uma unidade de beneficiamento de blocos de rocha ornamental. Extraído de Pellegrini, 2012.

A operação de estocagem de blocos no pátio da empresa normalmente é realizada por um guindaste tipo pórtico rolante, ao ar livre, com vão de 15 metros mais o balanço de 4,5 metros para cada lado, o que permite a utilização dos espaços laterais para a estocagem de blocos, além do armazenamento central. A capacidade de carga útil do guincho de pórtico é de no mínimo 40 toneladas, com uma elevação de 7 metros e velocidade de operação de 18 m/min. Equipamentos tipo monofio ou bifio diamantado, utilizados para realizar cortes nas laterais de blocos mais irregulares, permitindo-se assim um melhor ajuste nos blocos a serem serrados e conseqüentemente, redução das perdas e otimização da serragem, também podem ser utilizados com frequência, antes do processo de serragem propriamente dito.

Processo de desdobramento de blocos em teares multilâmina à granalha

O corte com tear de lâminas ocorre pela ação da granalha como o principal elemento abrasivo conduzido por um conjunto de lâminas movimentado pelo tear. O tear é formado por uma estrutura de sustentação com quatro colunas, que suportam o peso do quadro porta-lâminas. As lâminas são dispostas no sentido longitudinal do maior comprimento do bloco de material a ser beneficiado e tensionadas para manter um perfeito paralelismo durante o corte. Esse quadro é acionado por motor elétrico, que com auxílio de um volante, imprime um movimento pendular, responsável pelo atrito entre as lâminas, o elemento abrasivo (granalha) e o bloco a ser cortado. Simultaneamente, o conjunto quadro-lâminas é pressionado contra o bloco em um movimento de descida (cala), provocando o corte do material. O movimento pendular do quadro porta-lâminas propicia que a partícula abrasiva (granalha) corte a rocha de três modos, a saber:

- Riscamento;
- rolamento; e
- impacto.

A serragem dos blocos com teares multilâmina é amplamente difundida, independente do tipo de material a ser processado, sobretudo porque conjuga alguns fatores como maior flexibilidade operacional, boa produtividade e boa relação custo x benefício do investimento inicial. É o equipamento mais antigo, embora tenha sofrido ao longo dos anos inúmeras inovações e aperfeiçoamentos em busca de melhor desempenho. O processo de corte em tear pode ser representado por um fluxograma simplificado, conforme a figura 12, que apresenta as operações unitárias envolvidas no desdobramento de blocos com este equipamento. As principais fases da operação de desdobramento dos blocos em teares multilâmina à granalha são mostradas a seguir:

- Preparação da carga;
- carregamento do tear;
- laminação;
- controle dos insumos;
- controle do processo de serragem;
- descarregamento do tear;
- controle final; e
- manutenção.

O tear multilâmina utiliza, para o corte, lâminas de aço com ajuda de uma mistura abrasiva composta por água, cal hidratada, granalha de aço e pó de rocha. A densidade correta e constante adição de granalha nova (granalha ativa - superior a 0,425 mm), cal e água ao sistema, além de uma descida do quadro porta-lâmina (cala), condizente com as características de dureza e tenacidade da rocha, são a base da boa qualidade da serrada. Essa lama abrasiva percorre um circuito fechado sendo bombeada continuamente banhando o bloco a ser cortado.

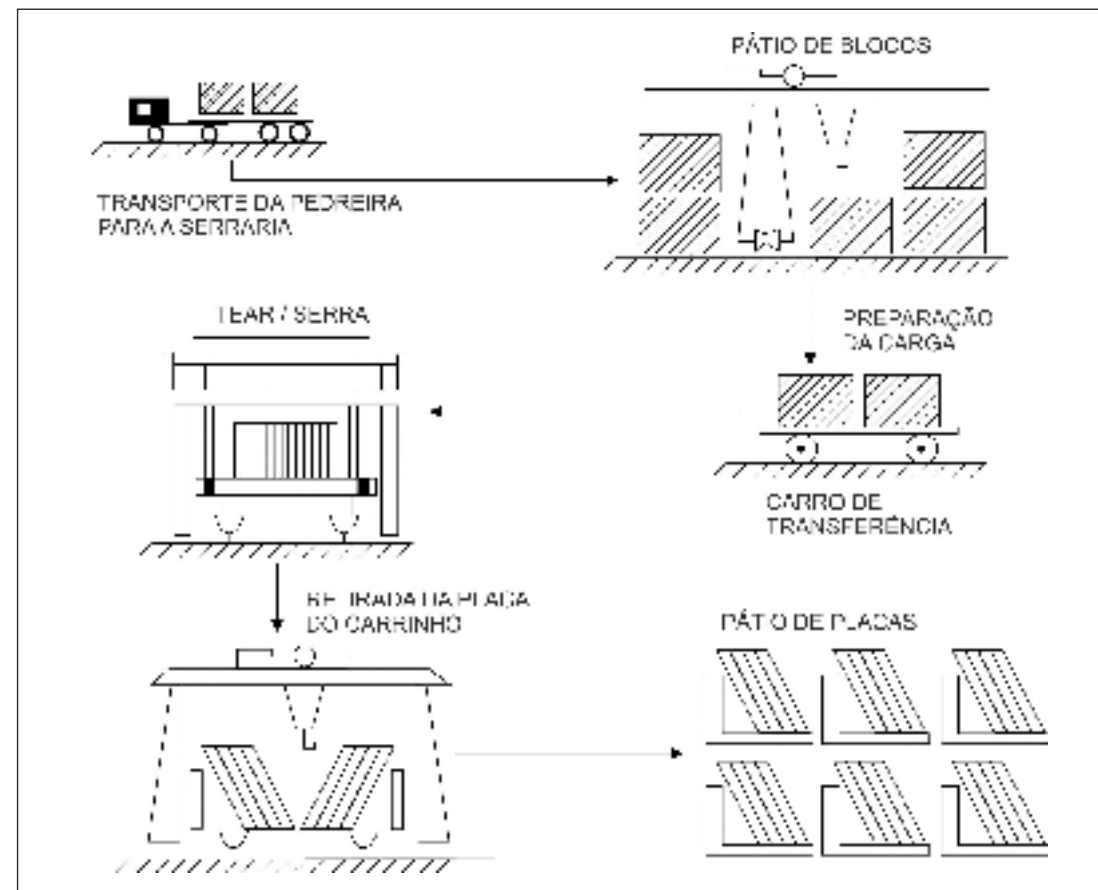


Figura 12 - Fluxograma simplificado do desdobramento em teares multilâmina. Extraído de Sampaio e outros, 2000.

Os carros porta-blocos são deslocados até a frente dos teares e posteriormente posicionados abaixo do quadro porta-lâmina do tear. Nesta posição, os blocos são fixados no carro porta-blocos com a colocação de argamassa na base do bloco, para o mesmo não sofrer deslocamentos durante a operação de serragem. Após a cura da argamassa, faz-se o posicionamento dos blocos sob os teares e dá-se início ao processo de serragem propriamente dito.

Após posicionamento no carro porta-bloco dentro do tear, iniciam-se os ajustes de operação do tear, que começa a etapa de laminação. Denomina-se laminação o grupo de operações relacionadas à colocação das lâminas de aço utilizadas nos teares para serragem dos blocos. Estas operações podem ser divididas em:

- Colocação ou substituição de lâminas: são colocadas no quadro porta-lâminas, dispostas no sentido longitudinal do movimento do quadro, sustentadas por um acessório denominado "cabresto", que dispõe de um pino onde a lâmina tem seu furo alojado preso nos chapões do quadro. Para cada lâmina usa-se um par de cabrestos;
- posicionamento das lâminas: corresponde à distribuição e espaçamento no quadro porta-lâmina e é definido pela espessura das chapas a serem produzidas, padronização e esquadreamento dos blocos, composição da carga e defeitos do material;

- aprumagem das lâminas: essa operação representa o nivelamento vertical das lâminas e deve ser feita lâmina a lâmina com auxílio de uma chave apropriada e verificação do prumo com uso de prumo de pedreiro ou nível de bolha. Uma lâmina com problema significa no mínimo duas chapas com defeito; e
- tensionamento das lâminas: o tensionamento é necessário para que a lâmina, durante seu processo de corte da rocha, não sofra alteração de posição, prumo ou alinhamento. O tensionamento pode ser realizado por processo manual (com utilização de cunhas fixadas por impacto, menos usual) ou mecanismo hidráulico, dotado de sistemas automatizados e regulares.

A laminação corresponde à distribuição das lâminas de aço sobre os blocos a serem serrados, utilizando-se espaçadores entre as mesmas de dimensões compatíveis com a espessura das chapas que se quer obter. Assim, há espaçadores para obtenção de chapas de 1,5 cm, 2 cm e 3 cm, que são as espessuras mais usuais para serragem de blocos em teares multilâmina. Após o tensionamento das lâminas, o quadro porta-lâmina é posicionado sobre o bloco e inicia-se a aspersão de lama abrasiva sobre o bloco, ligando-se também o sistema de translação do quadro porta-lâmina e o movimento de descida do mesmo (cala) em velocidade reduzida. Esta fase inicial de descida do quadro porta-lâminas é chamada de caseamento.

A resistência média à tração que as lâminas apresentam é de 5.000 a 6.000 MPa para serragem de mármore e rochas de baixa dureza, e de 7.000 a 9.000 MPa para granitos. A espessura tem pouca importância sobre sua resistência à flexão, mas influi muito na espessura do corte, na quantidade de material inutilizado e consumido na serragem, tanto para mármore como para granitos. Como a espessura do corte é cerca de 2 a 5 mm maior que a espessura da lâmina, o aumento de apenas 1 mm na espessura da lâmina, num bloco de 1,5 m de largura, significará uma perda de 3 a 4 chapas. À medida que a lâmina se desgasta, diminuem as suas resistências à tração e à flexão, fazendo com que o corte termine antes nas extremidades no bloco.

Em relação à largura das lâminas, a variação é devida ao tipo de tear e do material a ser serrado. Quanto maior for a largura, maior será a sua duração, maior sua capacidade de movimentar a polpa abrasiva e de manter a pressão adequada sobre a polpa, porém a montagem das lâminas é mais difícil, sendo às vezes necessário reduzir a viscosidade da polpa quando o corte se torna mais profundo, pois, com a utilização de lâminas mais desgastadas, a polpa abrasiva será menos movimentada.

A experiência mostra que as lâminas, no caso dos granitos, devem ter maior dureza, tenacidade e resistência à tração e à fadiga de tal modo que nunca seja superado o seu limite elástico, pois, a perda de rigidez, provoca um desvio do corte ocasionando chapas defeituosas.

Sabe-se que a eficiência de uma serragem está diretamente ligada à composição e à concentração da mistura abrasiva e que embora seja possível manter os mesmos componentes, suas concentrações podem variar com o decorrer do corte.

Após a entrada de pelo menos $\frac{1}{4}$ de todas as lâminas no bloco a ser serrado, inicia-se a fase de corte regular dos blocos, quando então se imprime a velocidade de descida do quadro porta-lâminas (cala) máxima, que pode chegar a cerca de 80 mm/h em rochas macias (granitos muito macios, calcários etc). A figura 13 apresenta um tear de movimento pendular juntamente com o sistema de poço e bombeamento da mistura abrasiva.

O bloco de rocha é colocado no tear, que constitui um equipamento robusto, formado por quatro colunas que sustentam um quadro que realiza movimento pendular. Neste quadro, são colocadas as lâminas de aço carbono de alta dureza, no sentido longitudinal e paralelas entre si.

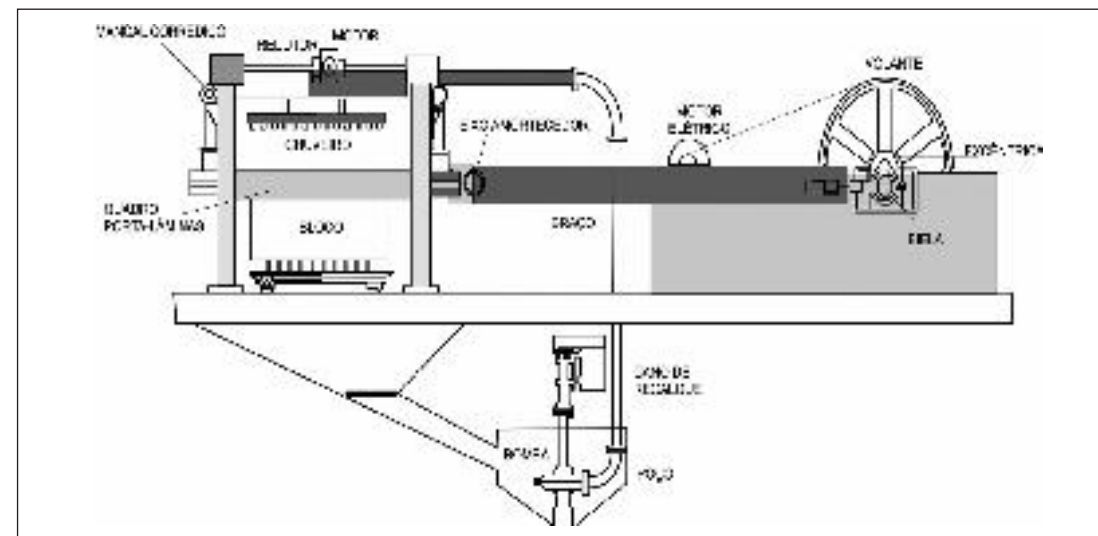


Figura 13 - Esquema de operação do tear multilâmina a granalha. Modificado de Machado, 2003.

A polpa abrasiva, composta por água, cal, granalha e fragmentos de rocha já desgastada pelo processo de serragem, é bombeada do poço de coleta, situado abaixo do tear, para um hidrociclone, operando com $d_{50} = 0,425$ mm. A fração de granalha ainda ativa retorna continuamente ao sistema. A fração fina descartada do hidrociclone (*overflow*), juntamente com a fração da rocha desgastada e a cal constituem o rejeito final do processo de serragem, que é depositado, geralmente, em aterros licenciados.



Figura 14 - Granalha utilizada na serragem de rochas ornamentais em teares multilâmina. CETEM/MCTI, 2012.

Dados operacionais de teares multilâmina

A serragem é a etapa do processo de beneficiamento com o maior demanda energética, sendo responsável por 60% do consumo de todas as etapas de beneficiamento. Em cada unidade de tear multilâmina se consomem, em média, 180.000 kW/mês.

O controle do processo de serragem em teares multilâmina se dá principalmente em relação à polpa abrasiva. Neste processo atenta-se para a qualidade da superfície serrada, fator essencial para um bom polimento.

A massa específica da polpa abrasiva, geralmente, varia entre 1.450 a 1.700 g/l. O volume total da polpa, por tear, é de 0,5 a 2 m³ e a vazão em circulação é de 30 m³/h para os teares pequenos e até 120 m³/h para teares maiores, o que representa cerca de 60 ciclos/h de circulação de lama abrasiva (STELLIN JR, 1998). A finalidade da cal é evitar a oxidação da granalha, a formação de superfícies de ferrugem nas chapas e regular a viscosidade da polpa abrasiva. Ao longo dos últimos anos, vem sendo cada vez mais utilizada a bentonita em substituição a cal. O mesmo autor diz que o tipo de material e sua serrabilidade são uns dos parâmetros mais importantes da serragem e por isso é mais correto referenciar a serrabilidade e não a dureza dos diversos materiais a serrar.

A serrabilidade dos granitos não depende da sua composição química, mas da compacidade, sendo mais fácil serrar os mais porosos, os alterados física ou quimicamente, e os que apresentam microfissuras no interior dos cristais (que debilitam a estrutura da rocha). Assim, são mais difíceis de serrar os materiais compactos, ou aqueles em que os poros estejam preenchidos por outros minerais, tornando a rocha mais homogênea com a união dos cristais, de acordo com Stellin Jr. (1998). Este autor relata que a avaliação da quantidade de partículas do bloco cortado presente na polpa é um índice de bom corte. Se os valores apresentados são inferiores aos usuais 33% a 45%, as serragens são consideradas defeituosas, enquanto valores superiores revelam que os materiais apresentam pouca tendência a dar polpas viscosas. Outro índice que indica um bom corte é o tamanho dessas partículas, não somente porque elas têm poder de abrasão como as granalhas, mas porque a falta de partículas grossas indica excesso de granalha na polpa.

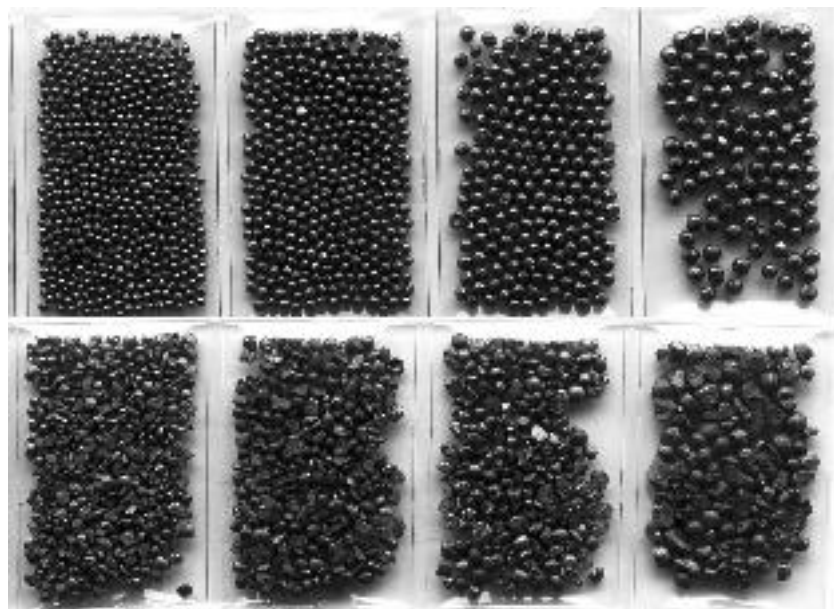


Figura 15 - Granalhas esféricas e angulares utilizadas no processo de corte de rochas ornamentais em teares multilâmina. Extraído de Machado, 2003.

Cabe ressaltar que a granalha constitui o verdadeiro elemento de corte, enquanto as lâminas têm a função de conduzi-la durante o processo e é um dos principais itens que entram na composição do preço dos granitos; quando usada de forma eficiente, reduz custos e tempo do processo de serragem. É encontrada comercialmente nos formatos esférico e angular (Fig. 15). As esféricas abrem espaço na rocha e têm o papel de rolamento para a lâmina, enquanto as angulares rompem os cristais da rocha (DE CAMILLES, 2004).

O tipo de rocha e seu grau de dureza (serrabilidade) são fatores preponderantes para a melhor escolha da granalha. Atualmente, as mais utilizadas para corte de granito são as granalhas de aço, numa mistura de angulares com esféricas, geralmente na relação 60% para 40%, respectivamente.

Os principais parâmetros controlados durante o processo de corte são os seguintes:

1. Altura (cm): durante o processo de corte, é necessário controlar quanto de rocha já foi cortada, por hora, por meio de leitura numa régua de 200 cm, fixada ao lado do pilar de sustentação do tear.
2. Viscosidade: a viscosidade, stricto sensu, é uma medida da resistência de movimento do fluido, embora seja empregado rotineiramente na indústria de rochas ornamentais para avaliar a lama abrasiva. A “viscosidade”, avaliada através da coleta da lama abrasiva utilizada em teares, é mensurada apenas com a utilização de uma régua desenhada para este fim (Fig. 16).

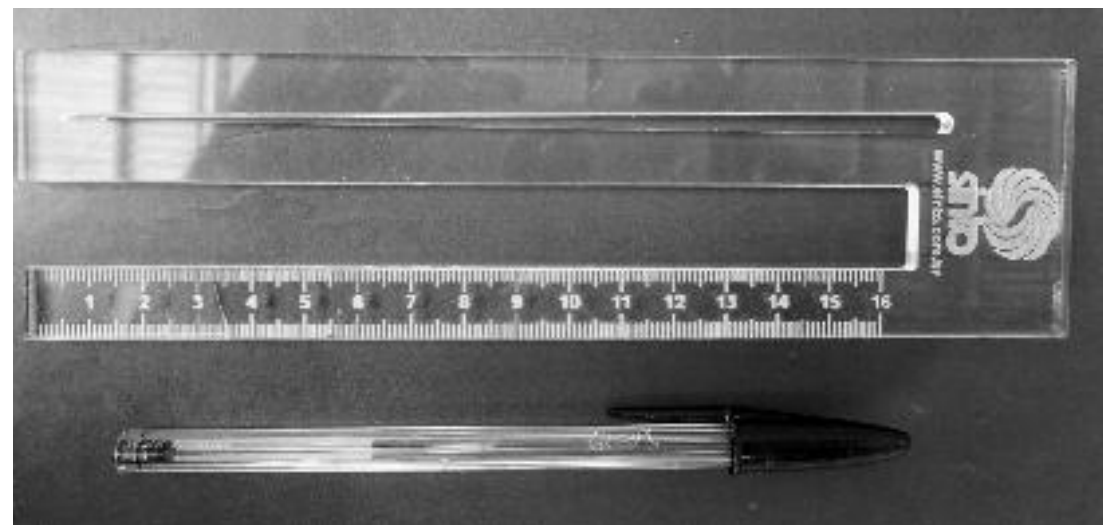


Figura 16 - Régua utilizada na medição da viscosidade da lama abrasiva. Foto: CETEM/MCTI, 2012.

O processo se inicia com a coleta de amostra da lama abrasiva em um recipiente. Esta coleta ocorre sempre no mesmo cano do chuveiro que a distribui sobre o bloco, em um procedimento padronizado, utilizando um recipiente com capacidade de 1 litro. Como se observa na figura acima, a régua é composta por duas hastes paralelas; uma contém um sulco e a outra uma escala graduada de 0 a 12, que cresce da parte inferior para a superior e é adimensional. Para medir a “viscosidade” (Fig. 17), a régua é introduzida no recipiente de amostragem contendo lama até tocar em seu fundo e, em seguida, retirada. A altura em que a lama permanece no sulco é medida na haste graduada e corresponde à “viscosidade” da lama abrasiva.



Figura 17 - Medição da viscosidade através de régua utilizada pelo setor. Foto: CETEM/MCTI, 2013.



Figura 18 - Granalha ativa retida após a passagem da lama sobre uma peneira de 0,4 mm de abertura. Foto: CETEM/MCTI, 2013.

3. Densidade (g/l): corresponde à quantidade de massa existente em um determinado volume. O mesmo recipiente de coleta de amostra, preenchido por lama abrasiva, é pesado em uma balança eletrônica para a obtenção da *densidade* e expressa em gramas por litro.
4. Granalha ativa (g/l): passa-se à lama contida no recipiente de amostragem em uma peneira de 0,425 mm de abertura de malha, a granalha que ficou retida é separada e pesada. Esta granalha é chamada de granalha ativa que é a contida na lama abrasiva e que efetivamente executa a serragem. O valor obtido em gramas por litro indica o quanto de granalha ativa há na mistura (Fig. 18).
5. Cala (mm/h): é a velocidade do corte da rocha, expressa em mm ou cm por hora. Depende muito do material que está sendo serrado, do perfeito funcionamento do tear e dos insumos utilizados. Normalmente, no início do corte, a velocidade é baixa (10 a 15 mm/h) para que ocorra o ajuste do sistema (encaixe das lâminas no bloco); posteriormente, esta velocidade vai crescendo em função da estabilização do processo de corte, chegando até cerca de 25 a 35 mm/h no final da serragem.
6. Amperagem do motor (A): a potência do motor que aciona as lâminas de corte é controlada pela corrente elétrica aplicada, expressa em amperes; normalmente, tal corrente oscila entre 30 e 40 A; acima de 40 A pode provocar danos ao equipamento e parada na serragem, independentemente da natureza da rocha.
7. Granalha (kg/h): este parâmetro indica a quantidade de granalha, em quilos, que abastece o sistema por hora. Normalmente, inicia-se o corte com a granalha que já se encontra no poço do tear, proveniente da serragem anterior. Posteriormente, com a evolução do corte, há necessidade de injetar granalha, pois durante o processo elas se desgastam, transformam-se em pó, e a lama perde sua capacidade abrasiva.
8. Expurgo (min): é o controle da descarga da lama para evitar que fique demasiadamente viscosa devido aos finos gerados no processo de serragem.

Outros parâmetros também são verificados durante o processo de corte, como a serrada (desgaste das lâminas), a marca de granalha utilizada, o tempo total de corte, as medidas do bloco, a espessura das chapas que serão cortadas (1,5; 2,0 ou 3,0 cm) e a quantidade de lâminas utilizadas.

Desde a entrada do bloco no tear até a sua saída, todos estes parâmetros devem ser acompanhados minuciosamente para um bom andamento do processo de corte. Como estes parâmetros interagem e em determinados momentos alguns se sobressaem mais que os outros, uma perfeita sintonia entre eles é primordial para que estrias, rugosidades e canaletas não apareçam nas chapas, imperfeições essas que podem dificultar a etapa de polimento.

Alencar e outros (1996) salientam que a pesquisa e a investigação destinadas ao maior conhecimento sobre o processo de corte possibilitaram algumas conclusões:

- O corte se dá pela ação abrasiva da granalha;
- a composição e a viscosidade da polpa abrasiva (lama) são variáveis de grande importância no processo, em geral, uma boa mistura abrasiva deve apresentar a seguinte composição: água 66,3 %, granalha ativa 3,1%, cal 1,2% e minerais 29,4%;
- a função das lâminas é conduzir o movimento de arraste e pressionar a polpa sobre o bloco; por isso, devem ser mantidas perfeitamente alinhadas e niveladas ao longo de todo o processo; e

- a regularidade da polpa abrasiva durante o corte permite apresentar superfícies de chapas cortadas com melhor uniformidade de acabamento e com baixa rugosidade.

Devido a grande quantidade de rochas utilizada para fins ornamentais, a alta variabilidade composicional e propriedades físico-mecânicas das mesmas, faz-se pertinente que tais fatores sejam considerados na definição a melhor situação operacional. Tal trabalho deve ser fruto de pesquisas e registro de desempenho e qualidade das serragens por parte de cada empresa, para cada material.

Os teares convencionais são dotados de sistemas automatizados e reguláveis, podendo reduzir o tempo integral de processamento. O sistema de mistura da lama abrasiva é processado através de poço dotado de bomba de polpa com motor de 40 CV e chuveiro tubular, acionados em conjunto. O sistema de alimentação da lama abrasiva demonstra ser de alta eficiência, considerando que a área de cobertura de cerca de 10 m² proporciona excelente espalhamento da mistura abrasiva na área operacional (superfície superior de corte do bloco).

A carga total do tear permite a colocação de um a quatro blocos dependendo da largura útil do tear (que hoje pode alcançar mais de 8,0 m) e da largura dos blocos a serem serrados. Em relação ao volume dos blocos os mesmos são divididos em dois grupos, a saber: G1 - possuem volumes que variam de 6,0 m³ a 9,0 m³; e G2 - volumes acima de 9 m³. A granalha é dosada pelo alimentador automático e homogeneizada através da bomba de polpa. Nos teares convencionais a carga útil colocada pode ter as dimensões máximas de 3,10 m de comprimento, por 2,80 m de largura e 2,0 m de altura. Nos teares chamados de Jumbo a carga útil colocada poderá ter as dimensões máximas de 3,50 m de comprimento, por 6,00 m de largura e 2,0 m de altura, propiciando assim o beneficiamento de blocos maiores e também de blocos menores. A figura 19 mostra um equipamento de corte modelo Jumbo multilâmina à granalha.



Figura 19 - Tear multilâmina à granalha (tipo jumbo). Foto: CETEM/MCTI, 2011.

Após dosada a lama abrasiva para o corte, inicia-se a serragem dos blocos, que tem a velocidade de penetração diretamente proporcional à dureza da matéria prima, controle dos insumos da serrada e condições operacionais do equipamento.

Concluída a serragem, a carga é retirada do tear, sendo as chapas lavadas com água para retirar a granalha aderida a fim de evitar-se o surgimento de oxidação superficial nas chapas. A otimização da operação dos teares está diretamente relacionada ao correto dimensionamento da carga, por meio da utilização de blocos padronizados e com as laterais o mais retilíneas possível, que ocupem na integralidade o espaço das máquinas, o que permite obter-se melhor rendimento.

O consumo de energia elétrica é considerado satisfatório, utilizando-se um motor principal de acionamento do volante e do quadro porta-lâminas de 60 CV, enquanto o sistema de subida e descida é comandado por uma caixa de cala, acionada por um motor de 7,5 CV e um motovariador de 2,0 CV. Como referência, pode-se indicar que uma empresa dotada de dois teares do Jumbo poderá produzir em torno de 5.000 a 8.000 m²/mês de chapas serradas.

Desdobramento de blocos em teares com lâmina diamantada (mármore)

O tear diamantado efetua o corte de rochas carbonáticas (mármore *lato sensu*) através da ação abrasiva de segmentos ou pastilhas de diamantes incrustados no gume inferior das lâminas (Fig. 20), formando uma espécie de serra acionada em um movimento de vaivém e da descida do quadro porta-lâminas sobre o bloco (ou subida do carro porta-bloco nos teares mais modernos).

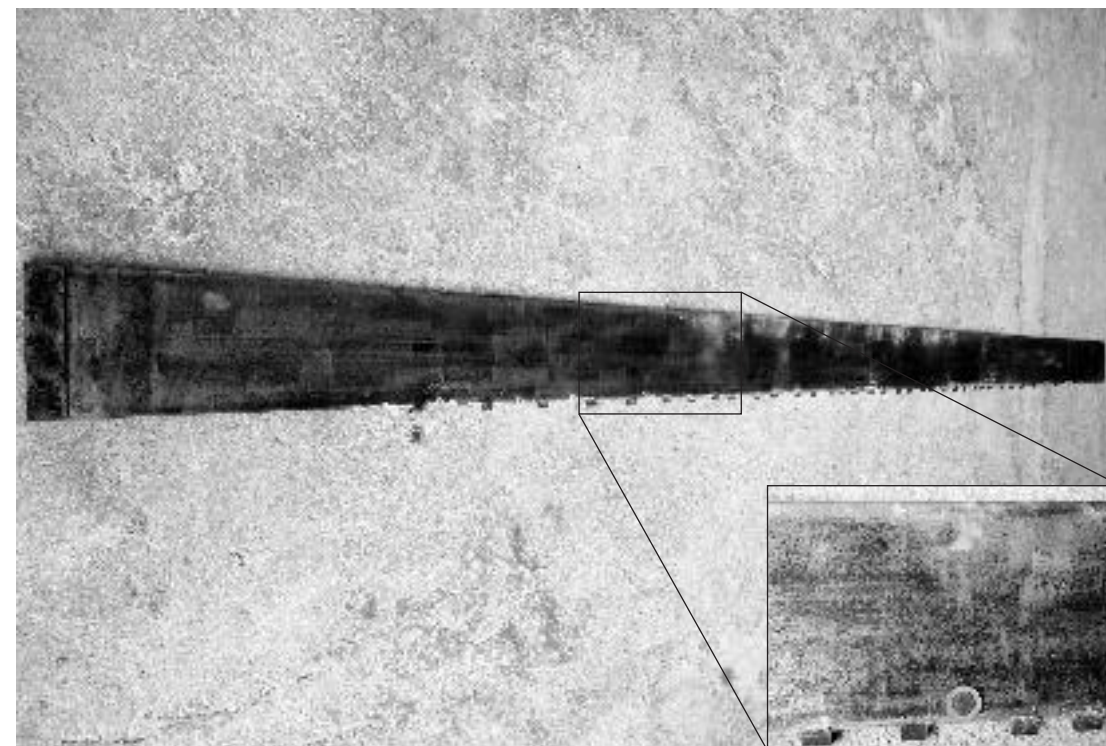


Figura 20 - Lâmina diamantada utilizada para cortar mármore. Notar o detalhe mostrando as pastilhas diamantadas. Fotos: CETEM/MCTI, 2012.

Durante o processo, o bloco e o conjunto de lâminas são constantemente banhados por água, que funciona como líquido de refrigeração e de limpeza e expurgo do material desagregado no corte. Os modelos disponíveis no mercado podem ser divididos em dois grupos: monolâmina e multilâmina. Os primeiros são indicados para a retificação das laterais de blocos e execução de peças especiais.

Os teares multilâmina diamantados, indicados para a produção de chapas brutas de espessura de 20 e 30 mm, na maioria dos casos são amplamente utilizados para o corte de rochas calcárias e similares, sobretudo pelo ganho em produtividade que proporciona e pela melhor qualidade das chapas produzidas. Esta máquina utiliza lâminas de aço especial sobre as quais são soldados segmentos diamantados. Na operação de corte é utilizada água industrial para resfriamento das lâminas e eliminação de materiais extraídos dos segmentos diamantados e fragmentos do material cortado. A velocidade de cala é elevada, por se tratar de material relativamente macio, situando-se ao redor de 15 a 25 cm/hora. As fases de operação são bastante semelhantes ao processamento de blocos em teares convencionais à granalha.

O carregamento do tear é realizado de modo análogo ao verificado nos teares convencionais à granalha, assim com o processo de laminação. Os teares diamantados em sua quase totalidade utilizam tensores hidráulicos para as lâminas, o que facilita o seu posicionamento e a manutenção da qualidade do corte durante o processamento dos blocos.

O controle de insumos e do processo de corte é simplificado em relação ao processo de corte convencional em teares multilâmina a granalha, pois não existe a lama abrasiva, cujas propriedades reológicas devem ser constantemente aferidas. Dessa forma, o controle de processo envolve basicamente o acompanhamento do nível de água no processo, velocidade de descida da cala, amperagem dos motores e encunhamento das chapas durante o corte.

Existem basicamente três tipos de teares diamantados, cujas diferenças residem na forma com que o corte das chapas é desenvolvido: tear com descida das lâminas, tear com subida do carrinho porta-blocos e tear com lâminas verticais.



Figura 21 - Bloco de mármore cortando em tear. Foto: CETEM/MCTI, 2009.

O primeiro equipamento possui sistema de corte que se desenvolve com a descida do quadro porta lâminas, ficando o carro porta-blocos parado durante essa fase, obtendo-se um movimento de descida semirretilíneo das lâminas. A água, que atua como elemento de refrigeração das lâminas e como agente para transporte dos resíduos de rocha, é de fundamental importância para obtenção de resultados satisfatórios e uma boa qualidade nas faces serradas (Fig. 21). A figura 22 mostra um tear multilâmina diamantado com operação de corte a partir do processo de descida do quadro porta-lâminas.

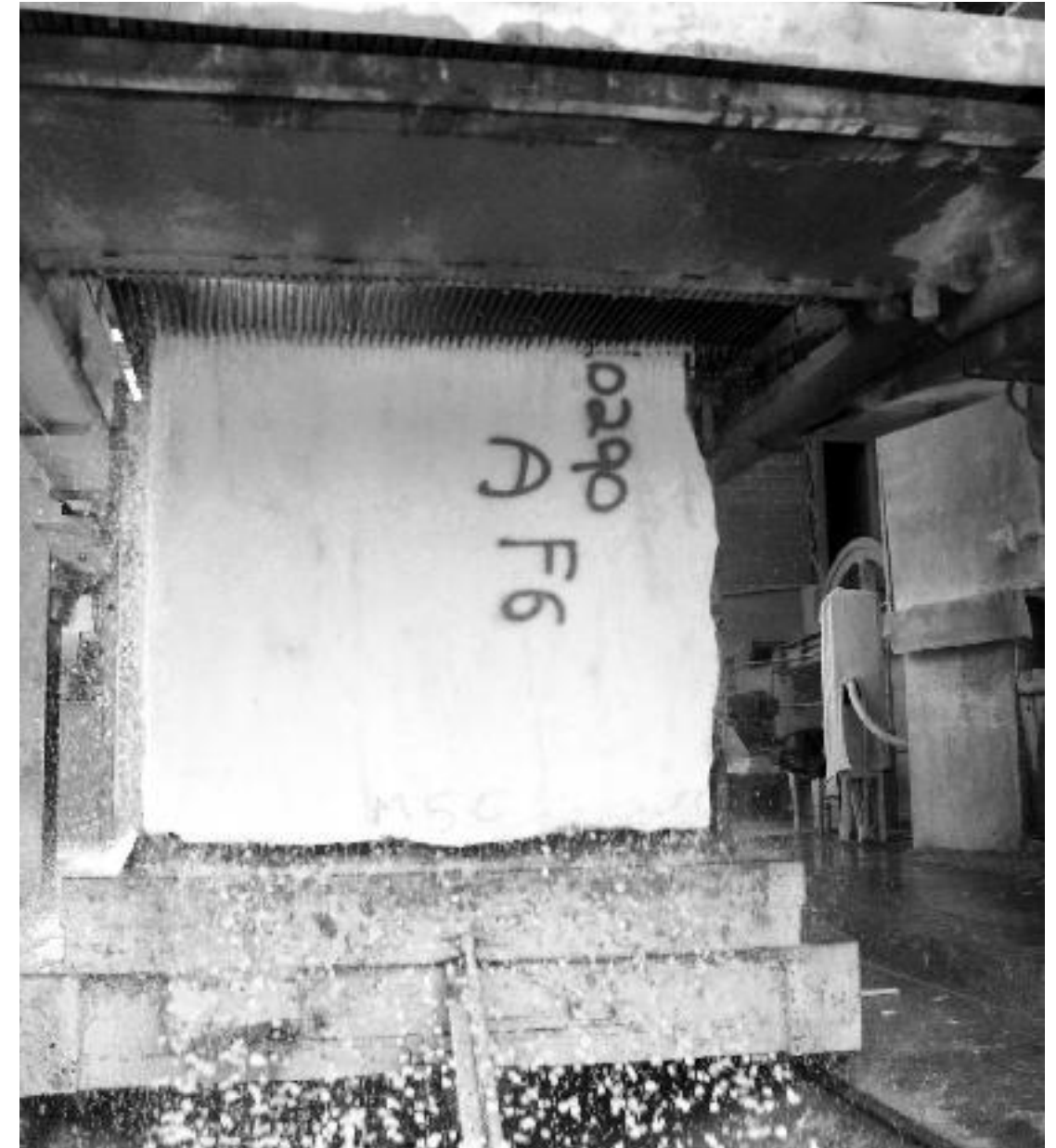


Figura 22 - Tear multilâmina diamantado com descida do quadro porta-lâminas. Foto: CETEM/MCTI, 2009.

O segundo equipamento possui sistema de corte que se desenvolve a partir da subida do carro porta-blocos utilizando-se um cilindro hidráulico, ficando o quadro porta-lâminas em movimento de vaivém retilíneo apoiado nas colunas do tear durante essa fase, obtendo-se um corte mais preciso e homogêneo das chapas.

O terceiro equipamento possui sistema de corte que caracteriza-se pela passagem horizontal do carro porta-blocos a partir de um quadro porta-lâminas montado na vertical, ficando o quadro porta-lâminas em movimento de vaivém retilíneo no plano vertical durante essa fase.

A água e o controle da velocidade de translação do bloco são elementos de fundamental importância para obtenção de resultados satisfatórios e uma boa qualidade nas faces serradas. Esse equipamento geralmente é utilizado para corte de blocos menores de material de baixa dureza.

Um outro tipo de tear multilâmina com o quadro porta-lâminas disposto na vertical foi desenvolvido totalmente com tecnologia nacional.

A empresa Ecoteares foi criada a partir da fusão da metalúrgica Fundisa e uma serraria de rochas ornamentais no município de Cachoeiro de Itapemirim-ES, que desenvolveram um novo conceito de equipamento para serrar os blocos de rocha ornamental. Este equipamento tem o nome de Ecotear e possui algumas inovações de significativa relevância em relação ao processo convencional de serragem dos blocos, a partir do fato, que este equipamento não necessita de água para realizar o corte.

Este equipamento, que também recebe o nome de Tear à Seco, tem como características principais a capacidade de desdobrar blocos de rocha ornamental em chapas com maior velocidade, melhor acabamento de superfície, menor consumo de energia.

No Ecotear a serragem é obtida através do atrito provocado pelo movimento tangencial das lâminas, em movimento semicircular contra os grãos de granalha, que por sua vez, caem em queda livre no interior do sulco de corte. Esses grãos são comprimidos, arrastados e rolados contra a face do bloco, promovendo uma erosão direcionada que levada até a face oposta, resulta na produção de chapas.

A figura 23 mostra o equipamento e o conceito de movimentação do bloco contra o quadro porta-lâminas, diferentemente do tear convencional. Quando tal equipamento estiver sendo comercializado em escala industrial marcará uma revolução na serragem de bloco de rochas ornamentais.

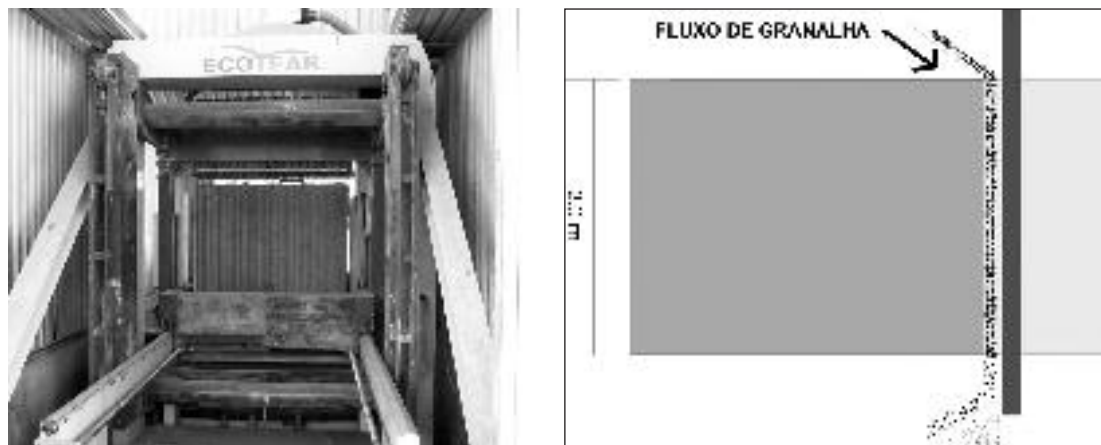


Figura 23 - Ecotear e ilustração da ação da granalha que cai em queda livre entre a lâmina e o bloco. Foto: CETEM/MCTI (2011) e Desenho: FUNDISA, 2005.

As tabelas 1 e 2 apresentam valores médios de consumo dos principais insumos utilizados na serragem de rochas ornamentais em teares multilâmina à granalha e de lâminas diamantadas, respectivamente.

Tabela 1 - Valores médios de consumo dos principais insumos utilizados na serragem de granitos comerciais em teares multilâmina.

Insumo	Consumo
Lâmina (kg/m ²)	0,30 – 2,50
Granalha (kg/m ²)	0,60 – 4,00
Cal (kg/m ²)	0,40 – 2,50
Bentonita (kg/m ²)	0,14 – 1,30
Energia (kW/m ²)	2,16 – 18,60

Fonte: CETEM/MCTI (2013) e Souza, 2010.

Tabela 2 - Valores médios de consumo dos principais insumos utilizados na serragem de mármore comerciais em teares diamantados.

Insumo	Consumo
Lâmina (pastilha diamantada) (g/m ²)	0,50 – 0,70
Energia (kW/m ²)	5,00 – 10,00

Fontes: CETEM/MCTI, 2013.

Os valores apresentados nas tabelas 1 e 2 são os normalmente encontrados na indústria. No entanto, por se tratar de materiais naturais de composição mineralógica e texturas variadas e por ser um processo que depende de muitas variáveis operacionais, os consumos podem diferir dos apresentados. Por exemplo, cortes de materiais muito duros, como quartzitos, podem consumir de 8 até 14 kg/m² de granalha.

Desdobramento de rochas ornamentais em talha-blocos

Os talha-blocos de disco diamantado são equipamentos que possuem uma estrutura formada por colunas metálicas ou base em concreto, que sustentam uma trave ou ponte em que está disposto o mandril com o conjunto de acionamento dos discos. Os talha-blocos são basicamente de dois tipos:

- Talha-blocos monodisco com disco de grandes dimensões;
- talha-blocos multidisco; e
- talha-blocos multi-eixo-multidisco.

Estes equipamentos são de uso mais recente e menos difundido do que os teares, sendo adequados para fins mais específicos (produção de ladrilhos padronizados). Os talha-blocos podem produzir chapas de grandes dimensões, com espessuras normalmente maiores do que 60 mm, no caso dos talha-blocos monodisco; e tiras de rocha ornamental com larguras de 300 a 640 mm e espessura a partir de 10 mm, no caso de talha-blocos multidisco.

Os talha-blocos monodisco são máquinas de grande dimensão, construídas inicialmente para produção de chapas de maior espessura, superiores a 50 mm (espessores). O equipamento utiliza discos diamantados de grande diâmetro (acima de 350 cm), podendo chegar até a 500 cm. Estes equipamentos conseguem cortar até profundidade entre 120 e 160 cm e são bastante difundidos

para obtenção de espessores destinados à indústria de arte funerária em países como Estados Unidos, Alemanha, Bélgica, Índia e países nórdicos. Atualmente também são encontrados na produção de espessores destinados ao processamento em linhas de produção de ladrilhos padronizados em equipamentos tipo talha-blocos multidisco diamantados multiteixo.

O disco corta a cada passagem do carro, sendo que o movimento de recuo e avanço do mandril ao longo da ponte e sua descida progressiva em cada passagem durante o processo de corte são completamente automáticos. Na figura 24 é mostrado um exemplo de equipamento tipo talha-bloco monodisco. O talha-bloco multidisco é empregado tanto para o corte de granitos como para o de mármore e destina-se à produção de tiras de larguras específicas, determinadas pela dimensão final que deve ter o produto e pelo diâmetro do disco.



Figura 24 - Talha-blocos monodisco para obtenção de espessores. Foto: CETEM/MCTI, 2007.

Existem dois tipos de talha-blocos multidisco mais difundidos no mercado: o talha-blocos de duas e o de quatro colunas, ambos possuindo o mesmo princípio de funcionamento, que consiste na ação de um conjunto mandril com diversos discos diamantados montados em um eixo sobre o bloco, que cortam combinando-se os movimentos de rotação dos discos e translação do conjunto mandril. Dessa forma, os discos executam cortes verticais e paralelos em várias passagens do mandril, cuja velocidade de corte depende da dureza do material. Após uma translação completa do conjunto mandril-discos a ponte é descida cerca de 0,3 a 1 cm para iniciar outro corte transversal do bloco. Esse processo se repete até chegar à profundidade máxima de corte do equipamento, que depende do diâmetro do disco diamantado utilizado. A profundidade máxima possível é de cerca de 1/3 do diâmetro do disco.

O processo de corte das tiras é complementado por um corte horizontal que permite destacar a tira do bloco. O corte é feito com um disco diamantado de diâmetro variável, entre 400 e 725 mm, que opera no plano horizontal. O número de discos de corte verticais varia de pouco mais de 20 até acima de 80, sendo mais difundidos os talha-blocos com discos variando entre 50 e 80 unidades.

Os modernos talha-blocos possuem instrumentos, dispositivos de automação e controle das operações que permitem automatização quase completa do processo, com a mínima intervenção de mão de obra, proporcionando, além de maior segurança e uniformidade de produção, uma produtividade média em torno de 8 m²/hora para granitos de dureza média até 20 m²/hora ou mais para mármore. As figuras 25 e 26 ilustram um talha-blocos multidisco operando sobre duas e outro em quatro colunas, respectivamente.



Figura 25 - Talha-blocos multidisco diamantados de 2 colunas. Foto: CETEM/MCTI, 2011.



Figura 26 - Talha-blocos multidisco diamantados de quatro colunas. Foto: CETEM/MCTI, 2012.

Desdobramento de rochas ornamentais com fio diamantado

A tecnologia de serragem com uso de fio diamantado é a mais recente das disponíveis atualmente e encontra-se em um estágio com possibilidades de grandes avanços no seu desempenho.

O processo de corte com fio ocorre pela ação abrasiva dos anéis, ou pérolas, diamantadas, que são dispostos ao longo do fio. Este funciona como uma espécie de serra fita que gira a determinada velocidade e é tensionado sobre o bloco.

Os equipamentos para corte com utilização de fio diamantado possuem características construtivas mais simples que os teares e os talha-blocos. As máquinas de corte com fio diamantado, tanto monofio quanto multifio, constituem-se basicamente em um conjunto de polias acionadas por um motor, que imprimem determinada velocidade e tensionamento ao fio. Alguns fabricantes já tornaram disponíveis modelos que permitem o corte programado em curva, o que possibilita a execução de cortes em formas e desenhos antes inimagináveis com outros equipamentos.

Essa tecnologia de corte é empregada basicamente no esquadreamento de blocos para retificação das laterais, no corte de espessores ou de peças para colunas, jardins, bancos etc. Também em equipamentos para o beneficiamento final de produtos compactos de diversas formas, tais como balaustres, estátuas e objetos decorativos em geral.

A figura 27 apresenta um equipamento mais simples e utilizado para retificação das laterais dos blocos brutos e também para a obtenção de peças especiais de rocha ornamental.



Figura 27 - Monofio diamantado para aparelhamento de blocos. Foto: CETEM/MCTI, 2011.

A evolução dessa tecnologia fez surgir nos últimos anos modelos de máquinas multifio diamantado para desdobramento de blocos com a utilização de um sistema multipolias, podendo cortar diversas chapas de rocha ornamental ao mesmo tempo. Esse equipamento, ilustrado na figura 28, é empregado para o corte de rochas silicáticas (granitos *lato sensu*).



Figura 28 - Tear multifio diamantado para desdobramento de blocos. Foto: CETEM/MCTI, 2012.

O sistema de corte por meio de teares multifio diamantado permite o corte de rochas ornamentais, predominantemente silicáticas obtendo-se elevada qualidade no acabamento superficial das chapas e boa produtividade em relação aos outros equipamentos de corte de blocos. A figura 29 mostra a característica do corte de blocos em um tear multifio diamantado.



Figura 29 - Detalhe dos fios diamantados cortando um bloco de granito. Foto: CETEM/MCTI, 2011.

Comparação entre teares multilâmina e multifio

Um estudo foi realizado por Souza *et. al.* (2012) a fim de comparar o processo de beneficiamento primário envolvendo os teares multilâmina (convencionais) e os teares de fios diamantados (multifio). Os resultados mostram as vantagens e desvantagens de uma tecnologia em relação à outra. Em

relação ao consumo de energia elétrica, em quilowatts por metro quadrado de chapa serrada (kW/m²), no tear multifio equivale a 68% do consumo do tear multilâmina. Considerando os insumos cal, granalha e lâmina para o tear multilâmina e o fio diamantado para o tear multifio, a comparação será em função dos seus respectivos custos (R\$/m²). Desta forma, o custo dos insumos no tear multilâmina equivale a 50% em relação ao tear multifio. No procedimento de serrada dos dois teares necessita-se de mão de obra especializada e também de manutenção em função do desgaste das máquinas. Portanto, no que se refere a custos de mão de obra e manutenção (R\$/m²), a serragem em tear multifio é 26% mais barata se comparado com o multilâmina. Observou-se também uma grande diferença de produtividade, ou seja, da produção (m² de chapas serradas) em função do tempo de serragem (h), parâmetro fundamental diretamente relacionado ao rendimento de cada tecnologia. A produtividade do tear multilâmina equivale a 16% da produtividade do tear multifio.

O resíduo gerado na serragem de blocos em tear multifio é uma lama composta basicamente por água, pó de rocha e micro cristais de diamante, desprendidos da pérola diamantada. No tear multilâmina, a lama contém pó de rocha, cal, água e fragmentos de aço oriundos da granalha e da lâmina. Em ambos os casos, mais de 95% da água utilizada é recirculada. A espessura do sulco gerado no processo de serragem em ambos equipamentos são de, aproximadamente, 6,8 mm no tear multifio e 7,6 mm no tear multilâmina. Em relação a produção de resíduo fino de rocha, decorrente do processo de serragem, pode-se dizer que os valores para as duas tecnologias são iguais, equivalendo, em média, a 26% do volume inicial do bloco. Porém, no tear multilâmina os insumos utilizados também se transformam em resíduo, o que indica que a quantidade final de resíduos é maior que no tear multifio. Segundo Souza e outros (2012) a relação entre quantidade de resíduo e a produção de chapas (kg/m²) que é gerado no tear multifio equivale a 79% do verificado no tear multilâmina. A figura 30 mostra os resultados quantitativos deste estudo comparativo.

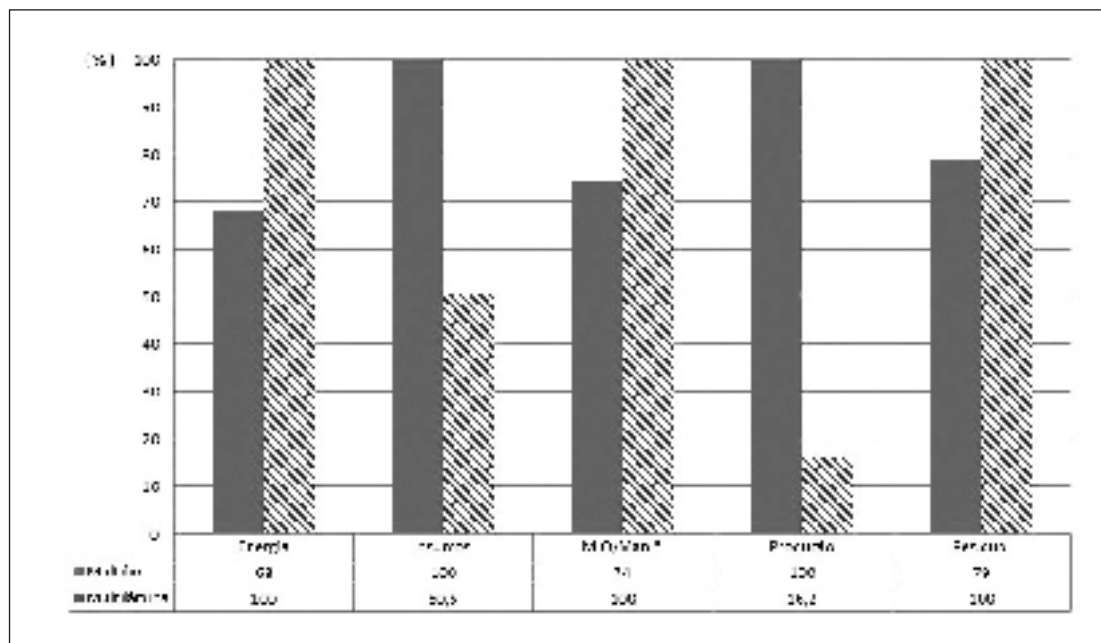


Figura 30 - Gráfico comparativo de custos operacionais entre as duas tecnologias. Extraído de Souza *et al.*, 2012. - Obs.: *Mão de obra e Manutenção.

Em relação a qualidade da superfície da chapa obtida da serrada com os teares multifio e multilâmina, a figura 31 representa o resultado obtido de uma amostra de chapa do granito comercial conhecido como Branco Ceará desdobrada no tear multilâmina e a figura 32 representa o resultado de uma amostra de chapa do mesmo granito desdobrada no tear multifio.

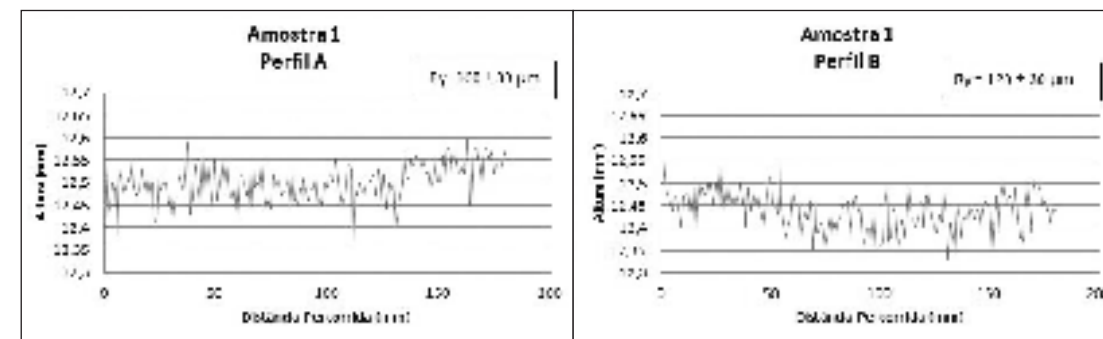


Figura 31 - Perfis de rugosidade do granito Branco Ceará serrado em tear multilâmina. Extraído de Souza *et al.*, 2012.

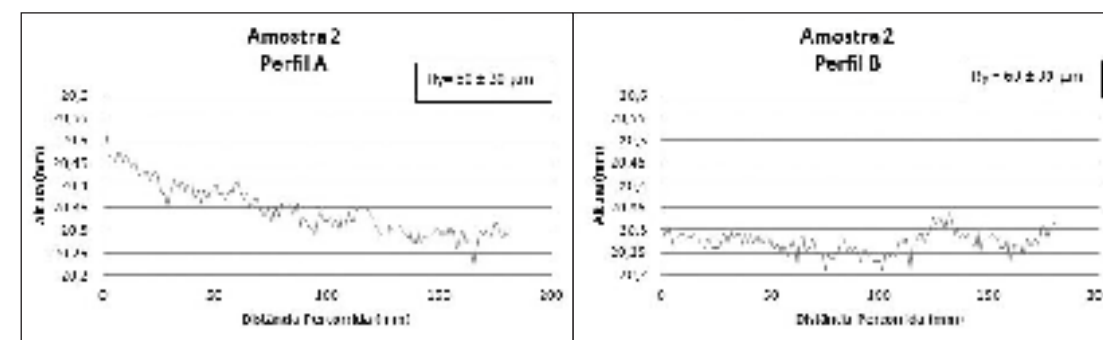


Figura 32 - Perfis de rugosidade do granito Branco Ceará serrado em tear multifio. Extraído de Souza *et al.*, 2012.

As chapas obtidas do processo de serragem dos granitos comerciais, geralmente apresentam variações na espessura, que podem ser observadas na forma das curvas dos gráficos acima, mas não influenciando a análise de rugosidade máxima (R_y).

Observa-se que, os R_y da amostra 1, que representa o corte em tear multilâmina, tanto no perfil A ($160 \pm 30 \mu\text{m}$) quanto no perfil B ($120 \pm 30 \mu\text{m}$) são maiores que os da amostra 2, que representa o corte em tear multifio (perfil A: $50 \pm 30 \mu\text{m}$ e perfil B: $60 \pm 30 \mu\text{m}$). Este parâmetro (R_y) indica a rugosidade máxima da superfície. Assim, como a amostra 2 apresentou menores valores de rugosidade máxima, pode-se inferir que a superfície é mais regular quando comparada à superfície da amostra 1. As demais amostras analisadas nesse estudo que foram desdobradas em teares multilâmina também apresentaram maiores valores de rugosidade máxima quando comparadas a amostras da mesma rocha desdobrada em teares multifio. Esse parâmetro tem influência direta no beneficiamento secundário (beneficiamento final/polimento) das chapas, no qual o consumo do insumo (abrasivo) é influenciado de forma direta pela rugosidade superficial das chapas.

Os custos finais de produção para materiais macios são menores no tear multilâmina, enquanto para materiais duros são menores no tear multifio. Essa diferença se dá pelo fato do corte no tear multifio ser mais rápido (cala maior), o que leva a um menor consumo de energia por metro quadrado de chapa serrada. Quando desdobramos um bloco de um material duro, que necessita de muitas horas de funcionamento no tear multilâmina, é mais vantajoso desdobrar no tear multifio. Mesmo com um maior custo do insumo, o menor custo de energia elétrica (devido a um menor tempo de serrada) faz com que o custo final de produção seja menor no tear multifio. Porém, essa abordagem de custos finais, não considerou o custo de oportunidade (o que poderia ser produzido na diferença de tempo de serrada entre os dois tipos de tear) (SOUZA *et al.*, 2012).

O tear multifio representa um equipamento mais evoluído tecnologicamente, visto que, segundo a Tribologia, imprime um desgaste do tipo abrasivo a dois corpos, enquanto que nos teares multilâmina o tipo de desgaste é a três corpos. Porém, alguns fatores devem ser considerados quando se pretende adquirir um tear. Em certos casos, os teares multilâmina ainda são os mais indicados, principalmente para empresas de pequeno porte e cujo mercado interno é o principal cliente. No Brasil, atualmente, existem cerca de mil e quinhentos teares multilâmina e cem multifio, embora este deva aumentar sua participação no parque industrial brasileiro. A produção de rochas ornamentais oriunda de talha-blocos e de teares diamantados pode ser considerada desprezível, quando consideradas a produção total de chapas do setor.

4. Processos de beneficiamento secundário

O processo de polimento de rochas ornamentais configura-se como a etapa mais importante dentre os tipos de beneficiamento secundário. Outras formas de acabamento superficial, como a flamagem, apicoamento, escovação, entre outras, são também realizadas no material pétreo. Esta seção mostrará essas formas de trabalho em chapas de rochas ornamentais.

4.1. A qualidade do brilho de chapas de rocha polida

Dentre os tipos de desgaste, o que ocorre nos processos de polimento de uma placa de rocha ornamental é o de abrasão. O processo de polimento e lustro de rochas ornamentais caracteriza-se por ser uma série de operações que reduzem a rugosidade da superfície trabalhada com vistas a transformá-la em uma placa com brilho. A intensidade do brilho que determinada superfície apresenta é função das propriedades refletivas da rocha, sendo também inversamente proporcional à sua rugosidade. Logo, o brilho e o lustro de uma rocha ornamental são conseguidos pela eliminação dessas rugosidades herdadas na etapa de beneficiamento primário e pelo “fechamento dos poros” entre os diferentes minerais que formam a rocha. Isto ocorre pela ação de elementos abrasivos que, conduzidos em movimentos de atrito sobre o material, vão desbastando-o até atingir o grau de polimento desejado, com o uso de abrasivos com granulometria decrescente.

A qualidade final do polimento de uma placa de rocha ornamental é determinada apenas por métodos empíricos. Como regra geral, tal parâmetro é inferido pela granulometria dos abrasivos utilizados durante as etapas de levigamento e polimento. Porém, a escolha do tipo de abrasivo,

a carga e velocidade de rotação das cabeças de polimento e a velocidade de avanço da placa, no caso de politriz automática, também são variáveis que assumem uma grande importância no brilho final da rocha.

4.2. Fatores que influem no polimento de rochas ornamentais

Certas características inerentes à rocha e outras relativas aos processos de beneficiamento são de fundamental importância para a melhor compreensão da etapa de polimento em rocha. Os principais fatores são detalhados a seguir:

1. Acabamento da “Serrada”: A etapa de beneficiamento primário irá imprimir à superfície da placa uma determinada rugosidade. Esta rugosidade será função da qualidade da serragem que o bloco de rocha sofreu. Quanto melhor for a qualidade da serrada menos rugosa será a superfície da chapa, e por consequência menor também o gasto de abrasivos nas primeiras etapas de polimento. Para definir se a serrada foi de boa qualidade, o setor utiliza de métodos empíricos, tais como:
 - passar uma régua de alumínio grande por toda a extensão da chapa, nas direções vertical, horizontal e diagonal, para verificar se há empeno; e
 - observar a presença de canaletas e entradas de lâminas nas cabeceiras de chapas, causadas por mal tensionamento de lâminas ou quebra de bico de lâminas inadequada.
2. Dureza da Rocha: Antes de começar o polimento, deve-se estabelecer a sequência correta dos grãos abrasivos, em função do tipo de rocha que será polida, levando-se em conta a sua dureza e o grau de dificuldade de fechamento entre as fases minerais presentes. As rochas ornamentais são divididas em: duras, médias e macias. Os critérios para esta divisão são puramente empíricos. Faz-se seguindo características operacionais (tempo gasto na serrada, velocidade de polimento etc.), não se tendo um real entendimento de quais características das rochas podem influir neste processo (mineralogia, textura, estrutura, grau de alteração etc.).
3. “Fechamento” do Polimento: A Indústria da Pedra convencionou chamar de “fechamento” uma característica relacionada com espaços e depressões que algumas placas já polidas podem apresentar. Tal fator está relacionado principalmente com a mineralogia: rochas sem quartzo, granada e biotita, (sienitos, por exemplo) tendem a apresentar bom fechamento. Porém, não se deve esquecer da qualidade do processo a que a rocha foi submetida. Muitas vezes a pressão de carregamento nos satélites pode ter superado a resistência mecânica do mineral, levando-o assim ao quebramento e a abertura de poros.

As variáveis que mais influem na capacidade de uma determinada superfície de rocha polida refletir a luz são:

 - Irregularidades de superfície – tais feições podem refletir a luz incidente em diferentes ângulos gerando uma diminuição no brilho da superfície; e
 - propriedades do material rochoso – mineralogia, massa específica e tamanho dos cristais, direção de corte em relação à orientação dos cristais e preenchimentos de macro e micro descontinuidades. O brilho de uma superfície de rocha polida também é função da diafanidade dos cristais, visto que os mesmos, muitas vezes, refratam a luz incidente diminuindo, assim, a quantidade de luz refletida.

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 grosseira têm uma diminuição nesta propriedade.

Uma das variáveis que mais influem na qualidade do brilho são os micro e macroporos. Uma certa quantidade da luz incidente na superfície da chapa é absorvida por micro e macro discontinuidades presentes na rocha. Limites entre os minerais juntamente com planos de clivagem e micro feições herdadas na gênese do material ou por decorrência de um processo industrial são as principais fontes de discontinuidades (Fig. 33).

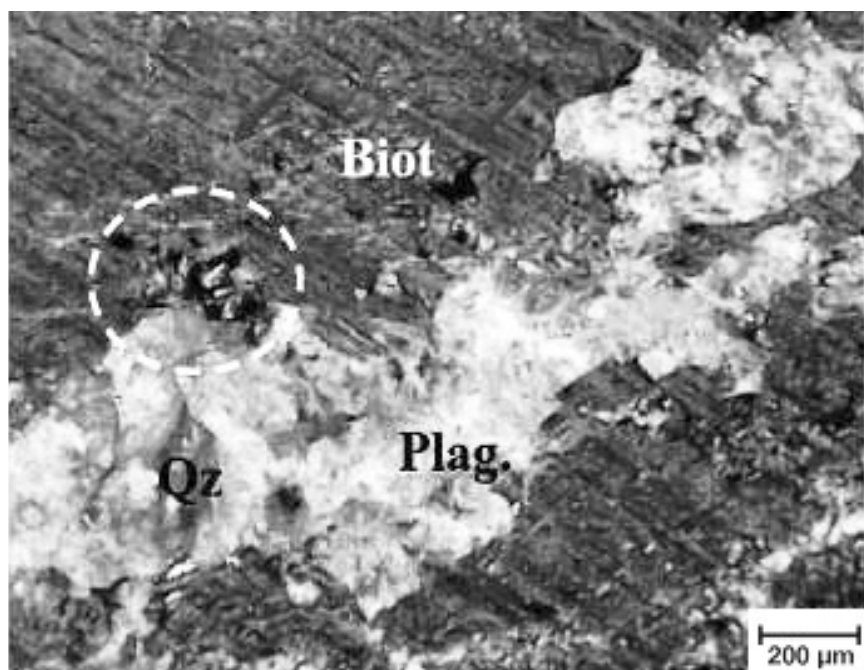


Figura 33 - Riscos originados pelos primeiros abrasivos passados pela rocha e porções de minerais retirados no processo (círculo tracejado). Extraído de Silveira, 2007.

Simmons e Richter (1976, *apud* Kranz, 1983) subdividem as microdescontinuidades, chamadas por eles de microfissuras, em:

- Fissuras de borda de grão – podem ser subdivididas em coincidentes ou não coincidentes ao limite atual do cristal. É normalmente difícil fazer a distinção entre estes dois tipos pelo fato de que a visualização do limite do grão muitas vezes não é óbvia. Em rochas que sofrem solicitação térmica ou mecânica, as fissuras de borda de grãos podem se propagar e se tornar contínuas ao longo de vários espaços intercrystalinos (Fig. 34);
- fissuras intracristalinas – caracterizam-se por serem relativamente pequenas, geralmente muito menores do que a maior dimensão do grão mineral e cerca de 1mm ou menos em espessura. Tais fissuras, quando naturais, podem estar preenchidas por outro mineral (Fig. 35).

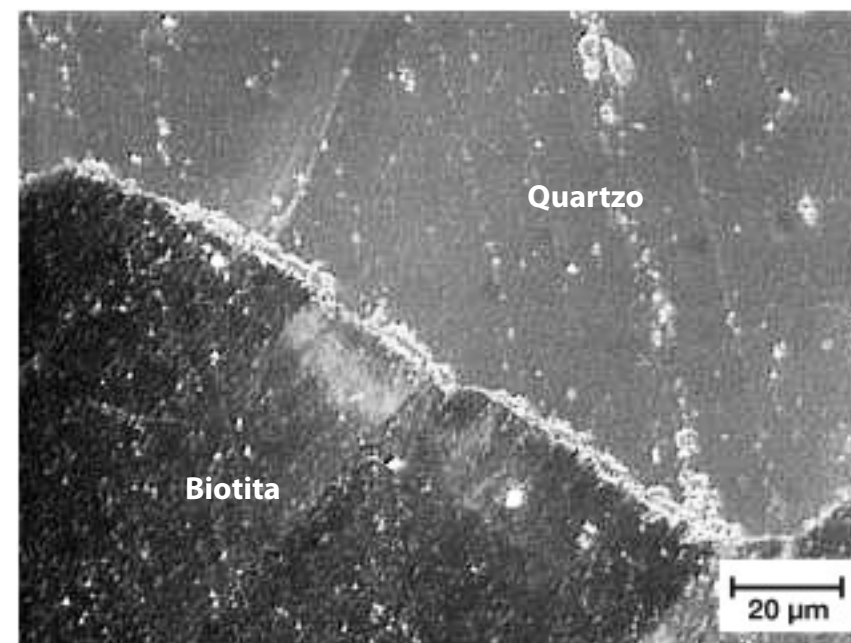


Figura 34 - Fissura desenvolvida no limite entre dois minerais Extraído de Silveira, 2007.

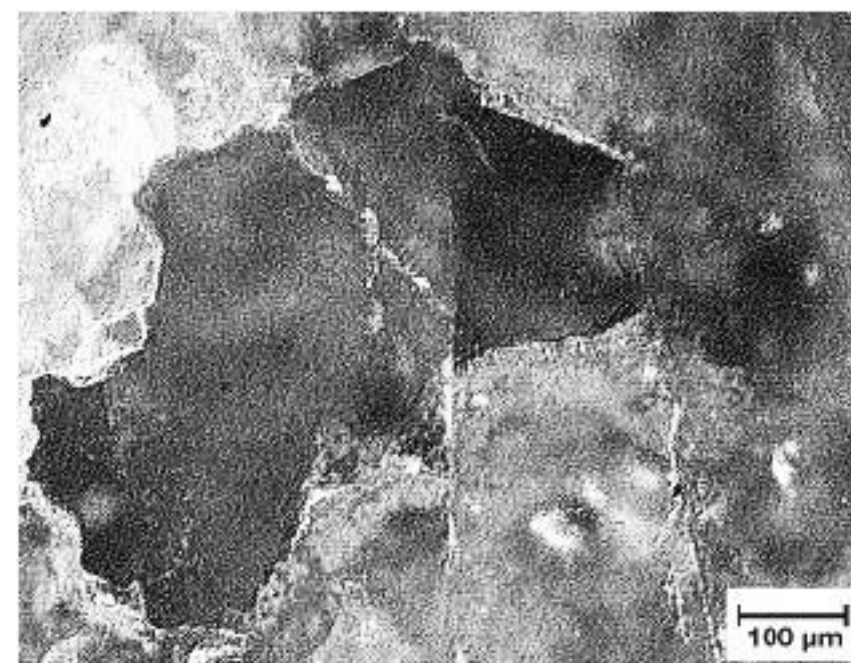


Figura 35 - Preenchimento de epidoto em fissura no interior de um cristal de quartzo. Extraído de Silveira, 2007.

- fissuras intracristalinas de margem – tais fissuras caracterizam-se por serem maiores do que as fissuras intracristalinas, mas são morfologicamente similares. Em solicitação mecânica, as fissuras intercrystalinas são normalmente orientadas ortogonalmente à direção de maior tensão (Fig. 36);

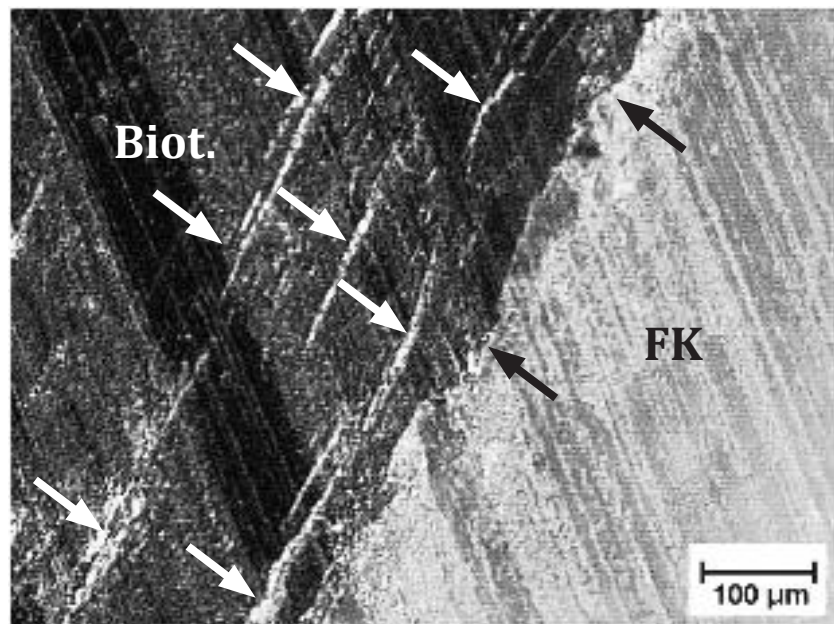


Figura 36 - Desenvolvimento de trincas no contato entre minerais (setas pretas) e trincas desenvolvidas pela tensão do rebolo abrasivo (setas brancas). Extraído de Silveira, 2007.

- fissuras de clivagem – são um importante subitem das fissuras do tipo intracristalina e merecem ser consideradas separadamente. Elas são separações ao longo dos planos de clivagem de um mineral e ocorrem frequentemente com vários comprimentos dentro de um determinado mineral. Vários planos de clivagem dentro do grão podem se fissurar. Em certas rochas, fissuras de clivagem podem estar preenchidas por materiais de alteração (Fig. 37).

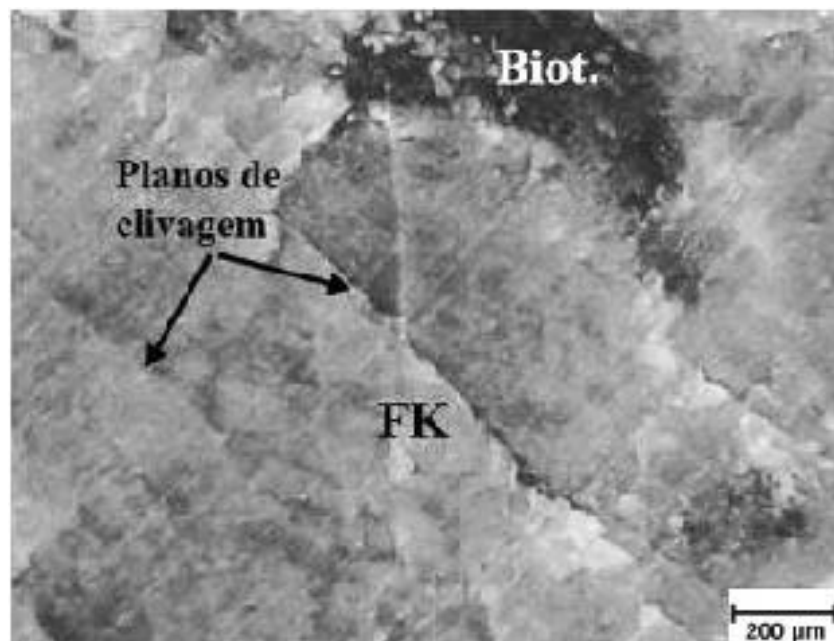


Figura 37 - Desenvolvimento de fissuras segundo planos de clivagem. Extraído de Silveira, 2007.

Um dos desafios no tocante ao polimento de rochas ornamentais é saber se o processo de polimento, por si só, ajuda a criar novas fissuras ou interfere nas preexistentes, abrindo ou fechando-as. Tal constatação poderá mudar a forma de ver o material pétreo como apenas um coadjuvante do processo de beneficiamento.

Todas as variáveis relacionadas à rocha, de certa forma, influem no seu comportamento quando submetidas ao polimento, mas não se sabe, exatamente, quais, nem o quanto.

A agressão que o material pétreo sofre, desde a lavra até o lustro é, na maioria dos casos, não levada em consideração. As características de resistência mecânica dos constituintes minerais (ou fases minerais) são diferentes entre si. Logo, a melhor situação de beneficiamento da rocha é aquela que contempla tais variáveis, sendo, dedutivamente, específica para cada tipo litológico.

Algumas rochas, por motivos estéticos e/ou tecnológicos, são submetidas aos processos de resinagem e telagem.

A resinagem visa aumentar a resistência da rocha a agressões por intempéries e melhorar o aspecto visual (Figs. 38, 39 e 40), enquanto que a telagem é aplicada em rochas muito fraturadas e com baixa resistência a esforços fletores.

Para se processar a resinagem, as rochas, já serradas, são submetidas aos processos de desgaste com o intuito de atingir a rugosidade ideal para a realização da resinagem.



Figura 38 - Linha de resinagem automática. Foto: CETEM/MCTI, 2011.



Figura 39 - Detalhe do procedimento de resinagem de chapas de rochas ornamentais. CETEM/MCTI, 2011.



Figura 40 - Detalhe do forno catalisador de cura. Foto: CETEM/MCTI, 2011.

Após o aquecimento das chapas no forno, processa-se a resinagem propriamente dita. Com a chapa ainda quente é aplicada, em toda sua superfície, uma mistura de resina e endurecedor (catalisador), em proporções que variam de acordo à composição mineralógica da rocha e da quantidade de fissuras que a mesma apresenta (Fig. 41).



Figura 41 - Aplicação da resina numa chapa de granito. Foto: CETEM/MCTI, 2011.

Rochas com elevado grau de fraturamento e formadas por grandes cristais, geralmente de feldspatos, como os pegmatitos, por apresentar grande número de fissuras inter e intracristalinas, algumas abertas, necessitam de outro tratamento, conhecido como estucamento. Esse processo consiste no preenchimento das fissuras abertas presentes na chapa com resina e pó da própria rocha (Figs. 42 e 43).



Figura 42 - Estucamento numa chapa com fissuras abertas. Foto: CETEM/MCTI, 2009.



Figura 43 - Vista de chapa de granito resinada e estucada. Foto: CETEM/MCTI, 2009.

Em alguns tipos rochosos faz-se necessário o preenchimento de vazios de grandes porções da rocha, como é possível verificar nas figuras 44 e 45. Exemplo de material no qual ocorrem tais feições é o jaspelito, comercialmente conhecido como Bronzite, que apresenta vazios de grande porte. Rochas carbonáticas podem necessitar também de tal tratamento.



Figura 44 - Chapa de um jaspelito contendo vazios. Foto: CETEM/MCTI, 2009.



Figura 45 - Chapa do jaspelito após o processo de estucamento. Foto: CETEM/MCTI, 2009.

Posteriormente à serragem da rocha ornamental, as chapas são submetidas ao processo de telagem. A tela é aplicada no tardóz (parte que não será polida) da maioria das chapas de rochas ornamentais serradas, para aumentar a resistência à flexão, de forma a evitar quebras ou trincas durante os processos subsequentes (levigamento, polimento) e durante o transporte. Nesta etapa, as chapas passam por um processo de desumidificação no forno (Fig. 46), após o qual é aplicada resina, geralmente epoxídica ou fenólica, como agente colante para fixação da tela.



Figura 46 - Forno de desumidificação para aplicação de resina no processo de telagem. Foto: CETEM/MCTI, 2011.

Em alguns casos, faz-se necessária, antes da telagem, a aplicação de resina na chapa e a fixação de um tecido que antecede a tela propriamente dita, com intuito de aumentar a resistência à flexão do material (figuras 47, 48, 49). Após a aplicação da tela e o período de cura da resina, de aproximadamente 24 horas, a chapa estará em condições de seguir para etapas seguintes: levigamento, resinagem e polimento.



Figura 47 -
Aplicação de resina
no processo de
telagem. Foto:
CETEM/MCTI, 2011.



Figura 48 -
Aplicação do tecido
na chapa. Foto:
CETEM/MCTI, 2009.



Figura 49 - Aplicação
da tela. Foto: CETEM/
MCTI, 2009.

4.3. Tipos de rebolos abrasivos para polimento de rochas ornamentais

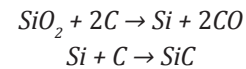
O termo abrasivo pode ser definido como uma partícula ou grão capaz de causar rápido ou eficiente desgaste em uma superfície sólida. A palavra abrasão provém do latim “*abradere*”, que significa arrancar partículas de um material por atrito com outro material, quase sempre mais duro.

A capacidade de determinado abrasivo em remover material submetido ao processo de desgaste é chamada de abrasividade. De acordo com o tipo de obtenção, os abrasivos podem ser classificados como:

1. Abrasivos naturais não silicosos:
 - diamante;
 - coríndon.
2. Abrasivos naturais silicosos:
 - quartzo;
 - granada;
 - pó vulcânico; e
 - diatomita.
3. Abrasivos naturais moles:
 - feldspato;
 - dolomita;
 - óxido de estanho (poteia); e
 - óxidos metálicos (Cr, Zn etc.).
4. Abrasivos artificiais:
 - diamante industrial;
 - nitreto cúbico de boro;
 - carбето de boro;
 - carбето de silício;
 - carбето de tungstênio; e
 - óxido de alumínio (alumina).

No setor de rochas ornamentais os abrasivos para polimento são divididos em dois grupos, a saber:

- **Abrasivos Magnesianos:** usam como ligante uma massa, produto da reação do Óxido de Magnésio (MgO) com Cloreto de Magnésio (MgCl₂), denominado comercialmente de “cimento sorel”, e como elemento abrasivo o Carbeto de Silício (SiC), também conhecido como “*carborundum*”. O Carbeto de Silício apresenta ligação covalente e é caracterizado por ser muito duro (9,5 na escala de Mohs), infusível e quimicamente inerte. Este composto é produzido a partir do aquecimento de quartzo ou areia com excesso de coque, em um forno elétrico a 2.000 – 2.500 °C, de acordo com a seguinte reação:



O SiC é muito pouco reativo e não é atacado por ácidos (exceto H₃PO₄). Geralmente apresenta cor púrpura escura, preta ou verde escura, devido a pequenas quantidades de ferro e outras impurezas, mas amostras puras são amarelas pálidas ou incolores. Apresenta uma estrutura tridimensional de átomos de Si e C, sendo cada átomo rodeado tetraedricamente por quatro átomos do outro tipo. Há um grande número de formas cristalinas, baseadas nas estruturas do diamante ou da wurtzita.

Estes abrasivos são fabricados em todas as granulometrias (granos) necessárias ao beneficiamento de chapas, geralmente de 1.190 μm a 9 μm (16 a 1500 *mesh*, respectivamente, na nomenclatura do setor)(Fig. 50).

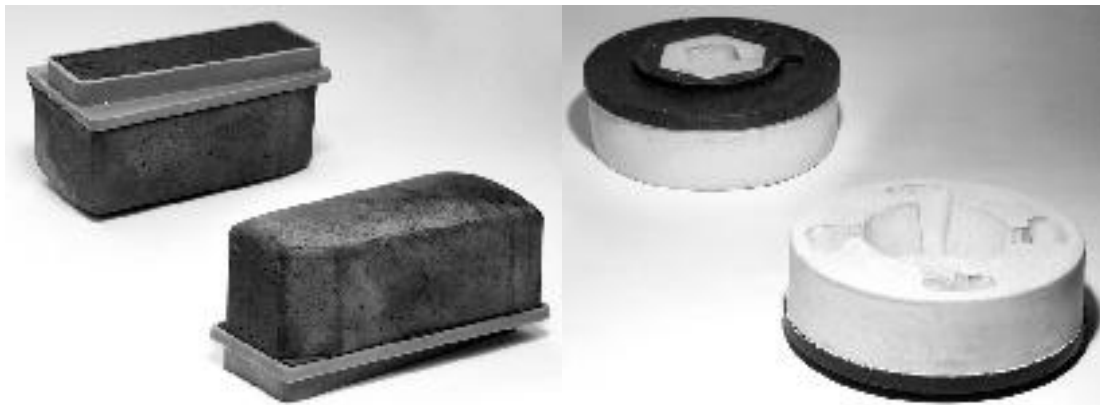


Figura 50 - Modelos de rebolos abrasivos magnesianos. Fotos: Cobral Abrasivos, 2013.

- **Abrasivos Diamantados:** fabricados em liga de ferro e cobalto (entre outros metais) ou em resina epoxídica, estes abrasivos são os que representam a maior evolução tecnológica dos últimos anos referente a polimento de rocha (Figs. 51 e 52). Utilizados há cerca de dez anos na Europa e há cerca de 5 anos no Brasil, estes abrasivos trazem numerosas vantagens na sua utilização em máquinas multicabeças. Os principais ganhos que este material pode dar são: aumento de produtividade e qualidade final, melhor qualidade da

água reciclada, diminuição no consumo de energia elétrica, menor pressão de trabalho, redução do tempo morto, entre outros. Este tipo de abrasivo é muito eficiente em remover marcas de chapas mal serradas.



Figura 51 - Modelos de rebolos abrasivos diamantados metálicos. Fotos: Cobral Abrasivos, 2013.

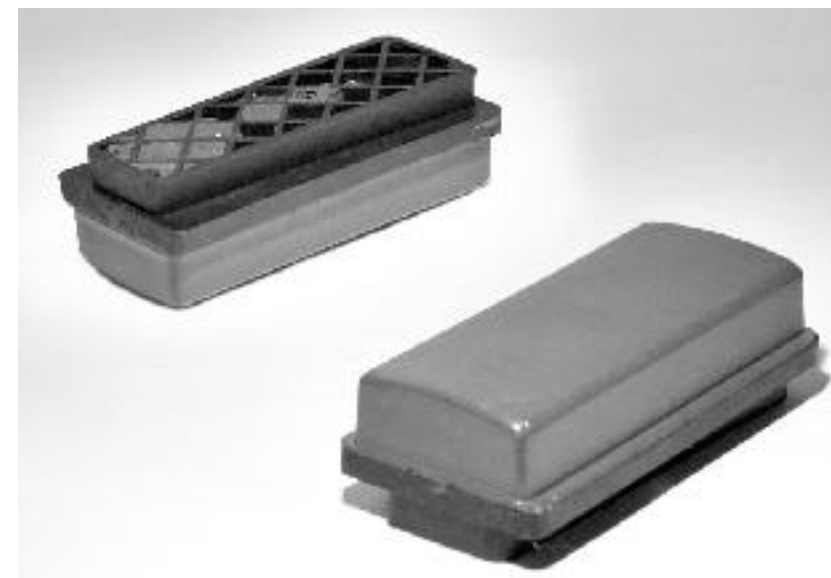


Figura 52 - Modelos de rebolos abrasivos diamantados resinoides. Fotos: Cobral Abrasivos, 2013.

Para rochas carbonáticas os rebolos abrasivos mais utilizados são os do tipo Frankfurt, caracterizado por uma superfície de contato plana e com um vão para o escoamento da água (Fig. 53). Tais abrasivos são utilizados em satélites específicos chamados de pratos, pois não apresentam movimento pendular do abrasivo, diferentemente do verificado no satélite de polimento de rochas silicáticas. Aspectos referentes aos tipos de satélite serão apresentados a seguir.



Figura 53 - Rebolo abrasivo do tipo Frankfurt para polimento de rochas carbonáticas. Fotos: Cobral Abrasivos, 2013.

5. Tecnologias de beneficiamento secundário

O termo beneficiamento secundário, ou final, pode ser entendido como todas as tecnologias aplicadas nos processos que conferem as características dimensionais, de conformação e especificação ao produto final. Assim, estão reunidos neste estágio os processos de acabamento superficial ou polimento (que ressaltam a coloração, a textura e a aparência do material), o corte (que lhes confere as dimensões, formas e desenhos), os acabamentos de bordas e outros especiais. O processo mecânico de polimento merece ser estudado com atenção, visto que são as interações entre rebolo abrasivo e máquinas de polir que imprimem à rocha suas propriedades de brilho e de fechamento. A identificação das variáveis operacionais que influem no processo de polimento é de suma importância para um entendimento completo desse tribossistema.

5.1. Histórico da evolução tecnológica das politrizes

Desde a década de 1930, quando se iniciou o processo de polimento de mármore e similares em escala industrial, no início com uso de areia e posteriormente de Carbetto de Silício, até o final dos anos 1960, a técnica de polimento e lustro de rochas ornamentais pouco evoluiu. As evoluções apresentadas ocorreram, basicamente, na forma de acionamento e na construção das politrizes manuais (Fig. 54), que funcionavam com um grande prato giratório, como responsável pelo movimento e contato do elemento abrasivo com o material polido. Este equipamento é constituído de uma coluna que sustenta um braço, o qual tem na sua extremidade o conjunto cabeçote onde são fixados os rebolos abrasivos. As chapas de rocha são colocadas deitadas sobre bancadas fixas de concreto, construídas ao lado da coluna de sustentação do braço da politriz.



Figura 54 - Modelo de politriz manual. Foto: CETEM/MCTI, 2006.

Apesar de serem as primeiras máquinas utilizadas para o polimento de placas de rocha, são ainda muito empregadas, sobretudo nas pequenas marmorarias, cujo volume de produção (1 a 2 m²/hora, dependendo do operador e da qualidade da superfície serrada) não justifica o investimento em equipamentos mais modernos.

Nas politrizes manuais, a pressão do cabeçote e a trajetória do seu movimento sobre a superfície a ser polida dependem exclusivamente da ação direta do operador. Por este fato, são frequentes as variações da qualidade do polimento ao longo de uma mesma chapa.

Devido às limitações em termos de qualidade do produto e produtividade, o uso destas politrizes é bastante restrito, não sendo recomendadas para empresas de beneficiamento que desejam trabalhar com produtos de alta qualidade e elevado nível de produção. Porém, mesmo em indústrias maiores e modernas, é comum a existência desses equipamentos, pois existe sempre um volume de chapas onde defeitos originados da serrada ou a presença de microtrincas, não se recomenda o polimento em politriz de esteira, pois o risco de quebra é muito elevado.

Em meados dos anos 1970 surgiram as politrizes de ponte móvel com bancada fixa, também conhecidas como semiautomáticas (Figuras 55, 56 e 57). São equipamentos constituídos de um conjunto motorreductor 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 e ainda podendo-se imprimir uma pressão de trabalho uniforme, constante e mais elevada.



Figura 55 - Exemplo de politriz semiautomática de um cabeçote. Foto: CETEM/MCTI, 2011.



Figura 56 - Exemplo de politriz semiautomática de dois cabeçotes. Foto: CETEM/MCTI, 2011.

Embora tenha sido inegável o avanço no processo de polimento de granitos com a politriz de ponte, a mesma possui algumas limitações em relação à produtividade, à qualidade e à uniformidade no acabamento. Dentre tais limitações podem ser citados a necessidade de troca constante dos abrasivos do(s) cabeçote(s), o grande tempo de parada entre as cargas e descargas das chapas na bancada, a dependência da sensibilidade do operador para saber o momento ideal para trocar um abrasivo mais grosso por um mais fino, e a grande possibilidade de um polimento não uniforme entre chapas de um mesmo material. A grande inovação referente ao polimento de placa de rocha se deu no final da década de 1970. Com a invenção das politrizes multicabeças automáticas, alcançou-se um aumento considerável na produção de placas polidas.



Figura 57 - Exemplo de politriz semiautomática de três cabeçotes. Foto: CETEM/MCTI, 2011.

Este equipamento é composto por 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, disposta longitudinalmente a ela, é montada uma trave que sustenta os conjuntos motorreductor e cabeçote realizando 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. Os diversos modelos disponíveis no mercado oferecem configurações, geralmente, de 8 a 22 cabeçotes por equipamento. Quanto maior o número de cabeçotes, maior a produtividade para o determinado nível de qualidade do polimento (Fig. 58).



Figura 58 - Modelo de politriz automática multicabeça. Foto: CETEM/MCTI, 2011.

O nível de automação é muito elevado e oferece facilidades operacionais, como programação das velocidades de esteira e trave, alarme indicando o fim dos rebolos abrasivos em cada cabeçote, abastecimento e desabastecimento automático sem o manuseio do operador.

Na etapa final do polimento, pode ser aplicado, ainda, um intensificador de cor, com equipamento, objetivando ressaltar as feições da rocha. Tal procedimento é realizado por uma enceratriz, que geralmente é acoplada no final da linha de polimento (Fig. 59). Após esta fase, a chapa está pronta para ser comercializada.



Figura 59 - Aplicação de intensificador de brilho em chapa de granito. Foto: CETEM/MCTI, 2009.

5.2. Dispositivos para colocação dos rebolos abrasivos

No setor de rochas ornamentais, os dois principais dispositivos para se processar o polimento das chapas de rochas são conhecidos como satélites e pratos. São nos satélites que os rebolos abrasivos são acoplados, podendo ter configurações desde quatro até oito locais para disposição dos rebolos abrasivos, sendo o de seis o mais comum (Fig. 60). Os satélites são providos de um braço em cada rebolo abrasivo que realiza um movimento pendular do conjunto e que, devido a forma do rebolo ser convexa, permite que o mesmo fique com uma linha em contato com a superfície da rocha a ser polida, diminuindo assim, a tensão de carregamento que seria necessária para realizar o mesmo trabalho se o rebolo tivesse a superfície planar.

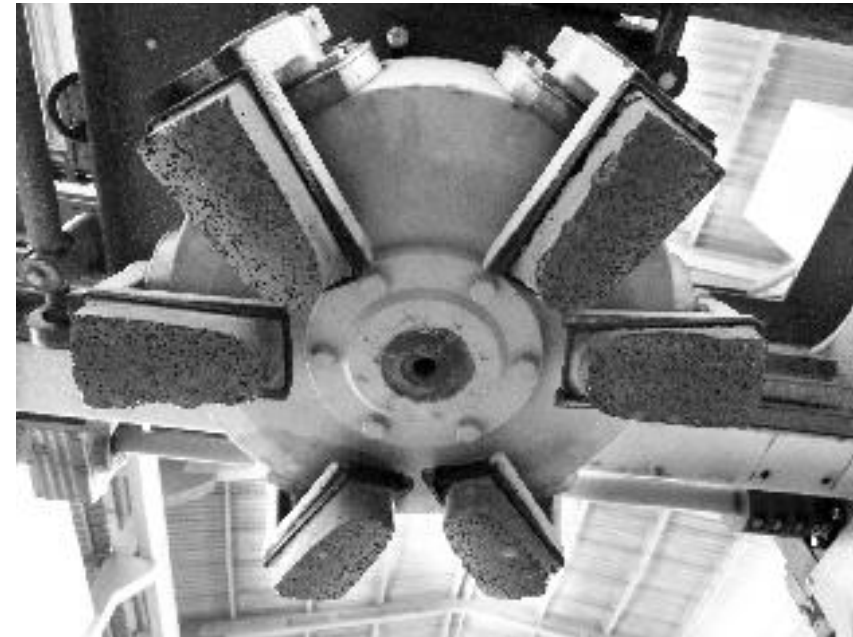


Figura 60 - Modelo de satélite utilizado no polimento de rochas ornamentais silicáticas. Foto: CETEM/MCTI, 2011.

Devido a menor dureza e maior homogeneidade mineralógica das rochas carbonáticas, o satélite utilizado para rochas silicáticas não é o melhor equipamento para se processar o polimento dessas rochas. O dispositivo que melhor desempenha o beneficiamento secundário para rochas carbonáticas é chamado de prato e difere do satélite principalmente pela ausência do movimento tangencial dos rebolos abrasivos e utilização dos rebolos do tipo Frankfurt, com geometria e composição específica para essa finalidade (Fig. 61).

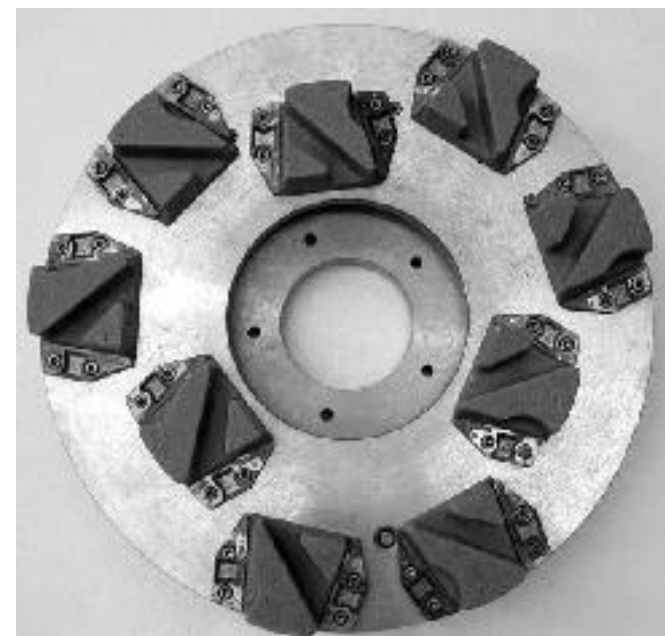


Figura 61 - Modelo de prato utilizado no polimento de rochas ornamentais carbonáticas. Foto: CETEM/MCTI, 2012.

5.3. Outros processos de acabamento superficial

O polimento é o processo mais usual no que tange o beneficiamento secundário. Porém, a rocha pode ser submetida a outros tipos de acabamentos superficiais, sendo os principais citados a seguir:

Flameamento

O flameamento é resultado do processo de acabamento da superfície da chapa bruta, utilizando água e maçarico de chama com alta pressão e temperatura da ordem de 1.500°C sobre a superfície, obtida com a mistura de oxigênio e acetileno. Devido a diferença nos coeficientes de dilatação térmica entre os minerais constituintes das rochas silicáticas (granitos *lato sensu*), o choque térmico causado pela passagem do maçarico sucedido pela água, provoca o desprendimento dos grãos de quartzo, resultando em uma superfície áspera com aspecto rústico (Fig. 62).



Figura 62 - Procedimento de flameamento de uma chapa de granito. Foto: CETEM/MCTI, 2012.

Apicoamento

Esse tipo de beneficiamento secundário processa-se com o auxílio de um martelo pneumático, com um bit específico para essa finalidade que, dependendo do seu desenho, confere um acabamento específico na superfície da chapa (Figs. 63 e 64). O impacto deste equipamento no material trabalhado causa uma fragmentação dos minerais, obtendo-se assim um acabamento áspero e opaco. As chapas de rochas tratadas com esse tipo de acabamento são utilizadas geralmente para pavimentação externa, revestimentos de fachada, degraus e peças especiais.



Figura 63 - Chapa de granito submetido ao processo de apicoamento. Foto: CETEM/MCTI, 2012.

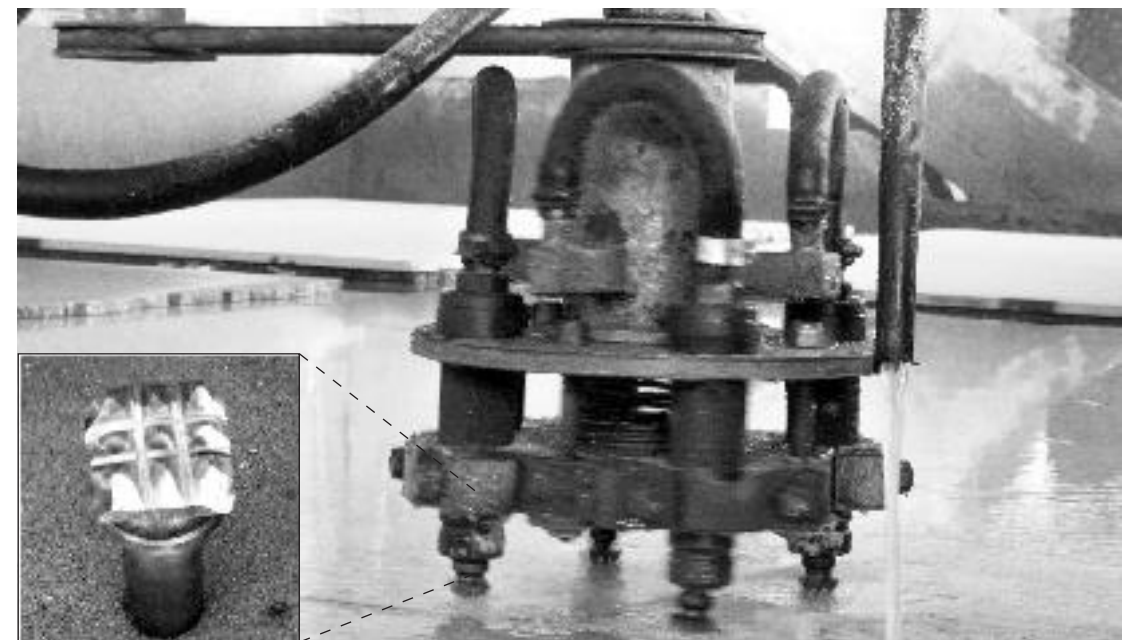


Figura 64 - Detalhe do martelo pneumático e a ponta utilizada no processo de apicoamento. Foto: CETEM/MCTI, 2012.

Jateamento

É realizado na chapa serrada uma limpeza, com auxílio de uma bomba de pressão, por meio de uma solução formada pela combinação de ácidos inorgânicos, corante e água na proporção 5 de água para 1 de produto químico, cujo resultado é uma superfície lisa, porém ainda rústica e sem brilho. É muito usado em pisos como antiderrapantes e bordas de piscina (Fig. 65).



Figura 65 - Processo de jateamento de uma chapa de rocha ornamental. Foto: CETEM/MCTI, 2012.

Escovação

Este processo é geralmente realizado com o auxílio de um prato para polimento de rochas carbonáticas, porém trocando os rebolos abrasivos do tipo Frankfurt por escovas diamantadas. A aparência final da rocha é rústica, mas é possível verificar um leve brilho (Figuras 66 e 67). É geralmente aplicado em pisos externos e peças de marmoraria, podendo, entretanto, serem utilizadas em satélites de politrizes automáticas e semiautomáticas (Figura 68).



Figura 66 - Processo de escovação de rochas ornamentais. Foto: CETEM/MCTI, 2012.

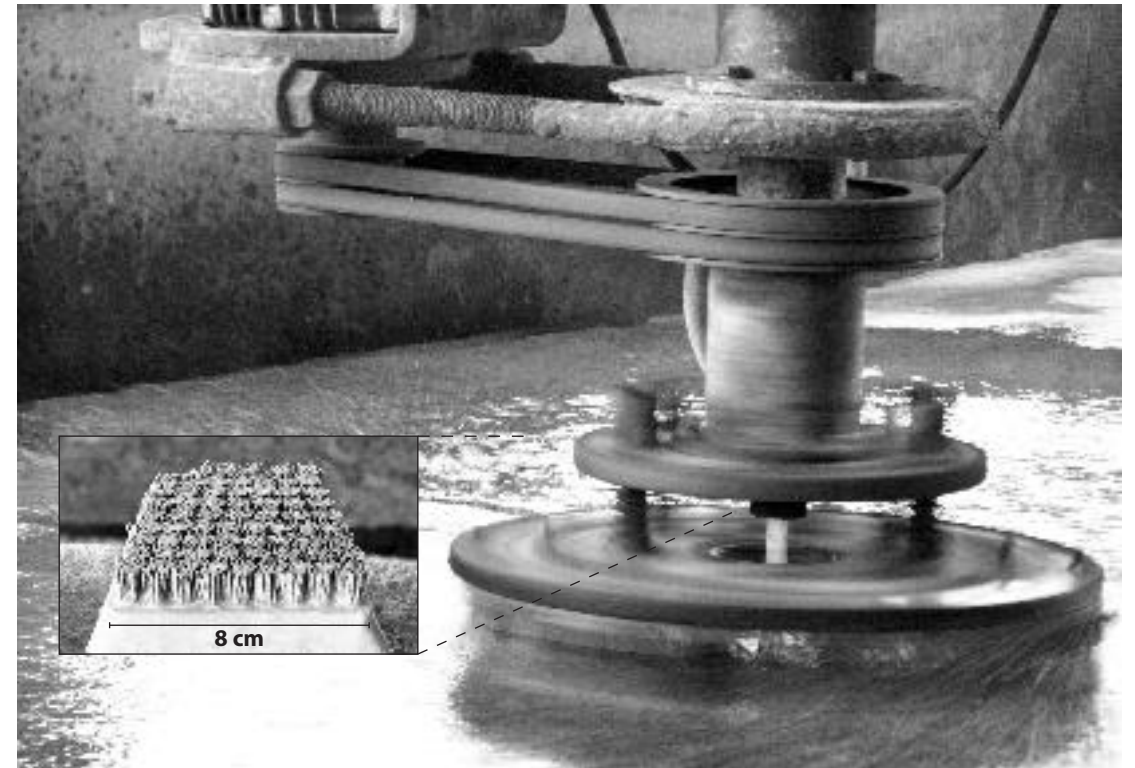


Figura 67 - Detalhe de um prato com escovas abrasivas utilizadas para escovação de rochas ornamentais. Foto: CETEM/MCTI, 2012.

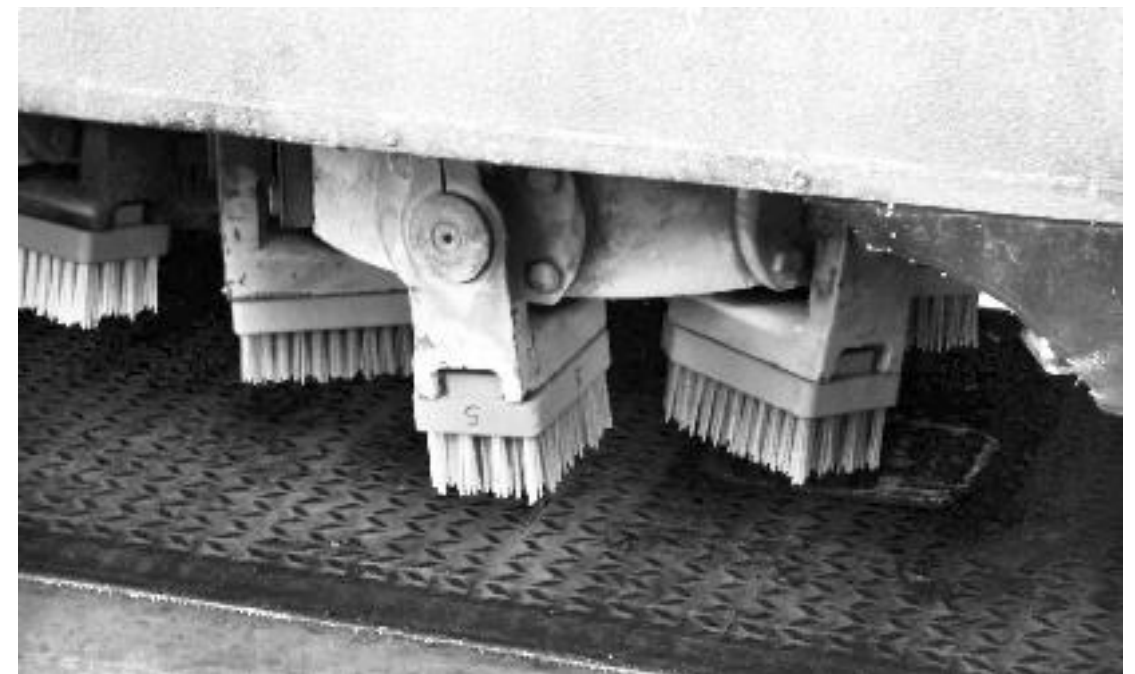


Figura 68 - Detalhe de um satélite com escovas abrasivas. Foto: CETEM/MCTI, 2011.

Além desses processos, existem outras máquinas que trabalham a superfície das rochas de distintas maneiras. Tais acabamentos representam pequena parcela do todo que é realizado no mundo. Isto se deve ao fato de que tais tecnologias ainda estão distantes do uso cotidiano, principalmente no tocante ao valor do equipamento e da demanda por estes tipos de acabamentos específicos. Entre eles podem ser citados:

- Tornos para rocha;
- equipamentos para corte de chapas curvas (*shine*);
- corte com jato d'água; e
- equipamento automatizado para corte de chapas com sistema *Cad/Cam*.

Depois da chapa de rocha ornamental passar por um dos tipos de beneficiamento secundário, ela pode seguir três caminhos:

- Venda da chapa acabada;
- corte da chapa em ladrilhos; e
- utilização em serviços de marmoraria.

Quando a empresa vende chapas de rochas ornamentais, após o processo de colocação das chapas no pátio de estocagem (Fig. 69) ocorre o carregamento das chapas diretamente em um caminhão, também conhecido como ovação em containers (Fig. 70).

As chapas são transportadas de duas maneiras: em posição vertical, com auxílio de cavaletes, ou horizontalmente. Em ambos os casos, as chapas são devidamente presas ao veículo transportador.



Figura 69 - Pátio de estocagem de chapas. Foto: CETEM/MCTI, 2012.



Figura 70 - Processo de carregamento de chapas em caminhão. Foto: CETEM/MCTI, 2012.

5.4. Corte da chapa em ladrilhos

O processo inicia-se quando a chapa levigada entra na cortadeira multidisco e é submetida ao recorte em forma de fitas utilizando-se discos diamantados de 350 mm acoplados aos cabeçotes (Fig. 71). A largura das fitas que serão transformadas em ladrilhos varia de acordo com a demanda, sendo que os tamanhos mínimo e máximo alcançados pelo equipamento em função do distanciamento dos cabeçotes são 30 x 30 cm e 60 x 60 cm, respectivamente (Fig. 72).



Figura 71 - Chapa a ser subdividida em fitas em cortadeira multidisco. Foto: CETEM/MCTI, 2012.



Figura 72 - Chapa subdividida em fitas em cortadeira multidisco. Foto: CETEM/MCTI, 2012.

As fitas, já subdivididas, são levadas para uma calibradora, como a da figura 73, mediante uma mesa de transferência. Nesse equipamento as fitas recebem uma calibragem especial com rolos diamantados, de acordo com a solicitação do cliente. Caso não haja necessidade desse processo, apenas a esteira da calibradora permanece ativa a fim de transportar as fitas até a próxima etapa.



Figura 73 - Máquina calibradora de ladrilhos. Foto: CETEM/MCTI, 2012.

Em seguida, as fitas são conduzidas até uma mesa giratória a qual inverte a posição das mesmas para que o lado oposto ao calibrado receba o polimento correspondente à etapa posterior (Fig. 74). Todas as fitas são submetidas a este processo, inclusive as não calibradas.



Figura 74 - Mesa giratória de fitas de rocha ornamental. Foto: CETEM/MCTI, 2012.

As fitas de rocha entram então na politriz, como a da figura 75, para receber o lustro final. A sequência de rebolos empregada varia em função da rocha, sendo geralmente uma combinação de abrasivos diamantados, magnesianos e resinoides.



Figura 75 - Politriz automática para fitas de rocha ornamental. Foto: CETEM/MCTI, 2010.

Após receber o polimento as fitas são submetidas ao recorte final na encabeçadeira automática, na qual são transformadas em ladrilhos (Fig. 76). O corte é efetuado com um disco diamantado de 250 mm que atende todos os tipos de rocha.



Figura 76 - Encabeçadeira automática monodisco. Foto: CETEM/MCTI, 2010.

Na etapa seguinte, os ladrilhos passam por fresas diamantadas para retificar possíveis erros de dimensões. Em seguida, os ladrilhos são submetidos ao processo de acabamento no bisote (Figura 77). Abrasivos magnesianos desgastam duas das arestas dos ladrilhos a fim de retirar o poder de corte das mesmas evitando que se quebrem. No percurso seguinte, uma mesa giratória troca o lado dos ladrilhos submetendo as outras duas arestas ainda brutas ao mesmo processo.



Figura 77 - Bisotes e fresa utilizados no acabamento dos ladrilhos. Foto: CETEM/MCTI, 2010.

Após estas etapas se processa a retirada total da umidade da superfície dos ladrilhos com o auxílio de um secador (Fig. 78), sendo depois acondicionados em caixas de madeira ou papelão, com proteção nas suas extremidades e devidamente fitados (Figs. 79 e 80).



Figura 78 - Processo de secagem dos ladrilhos. Foto: CETEM/MCTI, 2012.



Figura 79 - Procedimento para o acondicionamento de ladrilhos. Foto: CETEM/MCTI, 2010.



Figura 80 - Ladrilhos prontos para comercialização.. Foto: CETEM/MCTI, 2012.

6. Marmoraria

Essa etapa do setor, apesar de apresentar um relativo grau de diversificação em sua linha produtiva, tende a se especializar no atendimento a demanda por rocha ornamental em produtos específicos, para unidades residenciais individuais ou trabalhos que requeiram acabamentos mais elaborados. No Brasil existem cerca de 6000 mil marmorarias, com a maior parte de sua produção voltada para o mercado interno, produzindo, em geral, peças sob medida, como:

- Ladrilhos para revestimento, pavimentação e escadas;
- tiras (peitoril, soleira, rodapé, rodameio, filetes, contramarco etc.);
- bancadas (tampos de pia e mesa, balcões); e
- outros: lápides, divisórias, móveis etc.

Atualmente, a realidade do setor de marmoraria é bastante distinta, já que o processo produtivo (beneficiamento final) está restrito a serviços de pequena monta, normalmente para obras de pequeno e médio porte, nas quais os serviços ainda são de menor complexidade e volume. Porém os serviços de marmoraria são os que possuem os maiores valores agregados.

A Figura 81 apresenta um fluxograma esquemático dos processos operacionais na marmoraria. Ressalta-se que nem sempre se reproduz nas empresas que realizam o beneficiamento final exatamente este modelo apresentado. Podem ocorrer variações em função da disponibilidade de recursos tecnológicos que permitam a supressão de etapas ou fusão de outras, sobretudo nas fases de corte e acabamentos de superfície e borda nos ladrilhos. Na produção de padronizados (ladrilhos e revestimento interno e externo), o processo pode apresentar algumas diferenças em relação ao modelo citado.

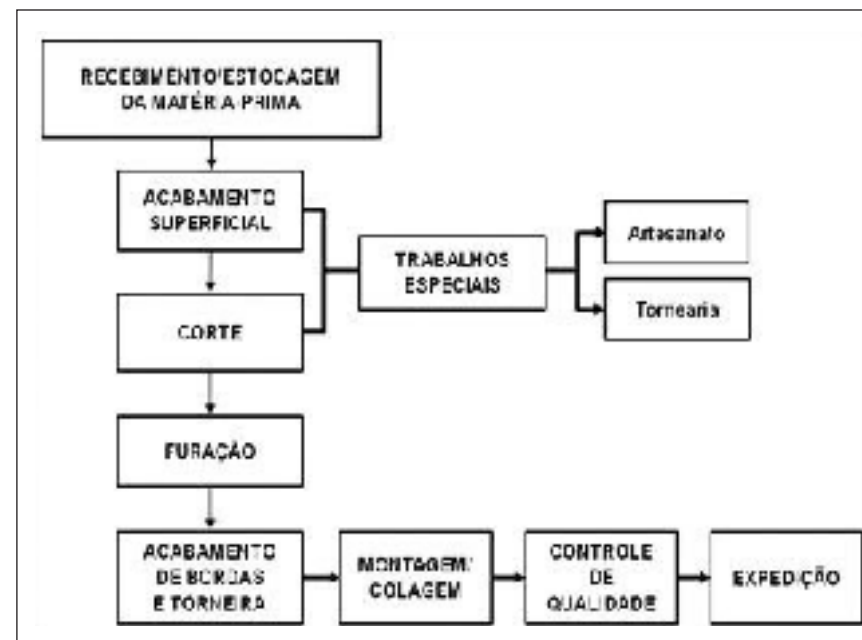


Figura 81 - Fluxograma esquemático dos processos operacionais na marmoraria. Elaboração dos autores.

A seguir serão mostrados os principais equipamentos e procedimentos existentes em uma marmoraria.

A máquina contornadora, a da figura 82, é utilizada para furação e corte do molde de bojo de pias (Fig. 83). O primeiro furo, central, é feito com uma ponta gráfica diamantada (Fig. 84). Em seguida, um segundo modelo de ponta gráfica executa o corte propriamente dito e um terceiro modelo dá o acabamento.



Figura 82 - Contornadora de chapas. Foto: CETEM/MCTI, 2010.

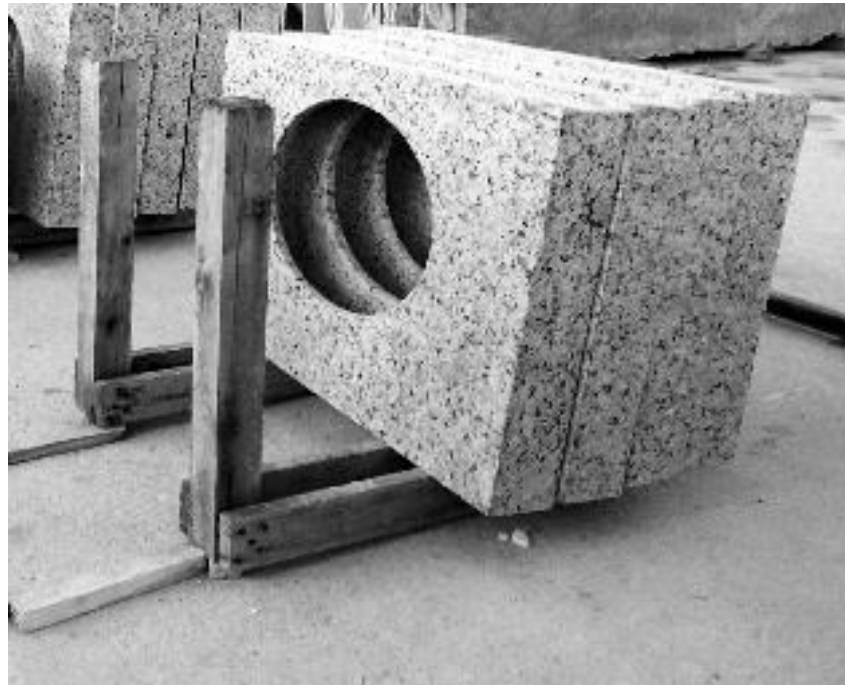


Figura 83 - Pias para comercialização.
Foto: CETEM/MCTI, 2012.



Figura 84 - Ponta gráfica diamantada para execução de furos em peças de marmoraria. Foto: CETEM/MCTI, 2010.

A serra ponte (Fig. 85) é utilizada principalmente para a fabricação de ladrilhos, tiras, espessos e painéis com chanfro. Já a cortadeira (Fig. 86) é utilizada principalmente para fazer cortes e acabamentos tipo meia esquadria (Fig. 87).



Figura 85 - Serra ponte de cabeçote móvel. Foto: CETEM/MCTI, 2011.

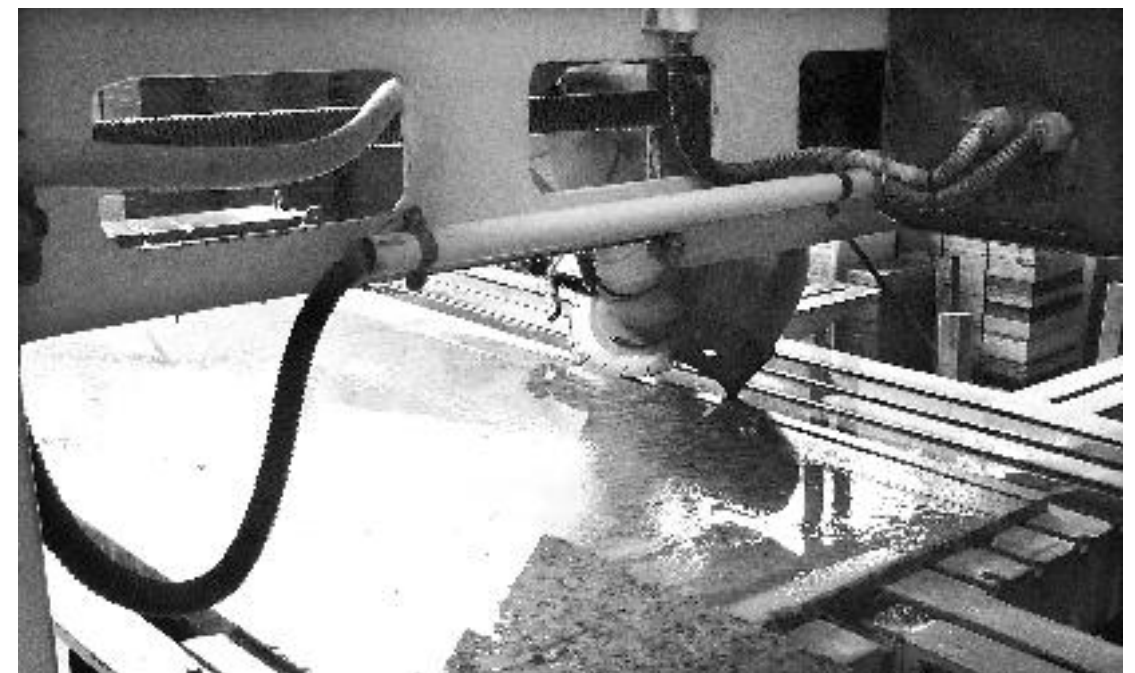


Figura 86 - Cortadeira monodisco semiautomática. Foto: CETEM/MCTI, 2010.



Figura 87 - Acabamento de borda tipo meia esquadria. Foto: CETEM/MCTI, 2010.

Os acabamentos de borda das peças de marmoraria são realizados em maquinário específico e/ou de maneira artesanal com o auxílio de uma lixadeira manual. Uma das máquinas que podem desempenhar esse serviço é a acabadora de bordas, também denominada de *Lucidacoste*, que realiza acabamentos de bordas de vários tipos; desde o reto, mais simples, até os mais elaborados como o boleado, meio boleado, chanfro, entre outros, mudando-se apenas as formas dos rebolos abrasivos (Fig. 88).

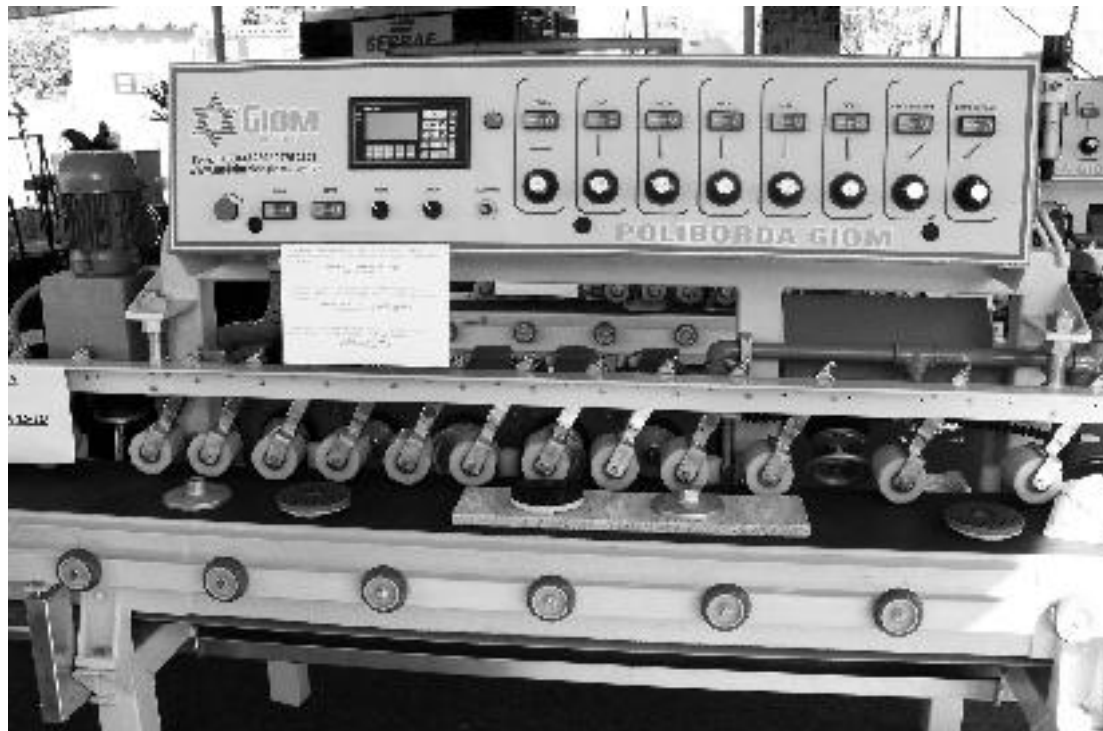


Figura 88 - Acabadora de bordas. Foto: CETEM/MCTI, 2013.

Os procedimentos manuais de acabamento de borda podem ser utilizados desde a quina viva da peça a ser trabalhada ou como retoque em acabamentos já realizados. A ferramenta mais utilizada para esta finalidade é a lixadeira manual (Figs. 89 e 90). As lixas abrasivas são flexíveis para permitir maior contato com a superfície a ser desgastada (Fig. 91).



Figura 89 - Início de acabamento de borda com lixadeira manual. Foto: CETEM/MCTI, 2012.



Figura 90 - Retoque no acabamento de borda com lixadeira manual. Foto: CETEM/MCTI, 2010.

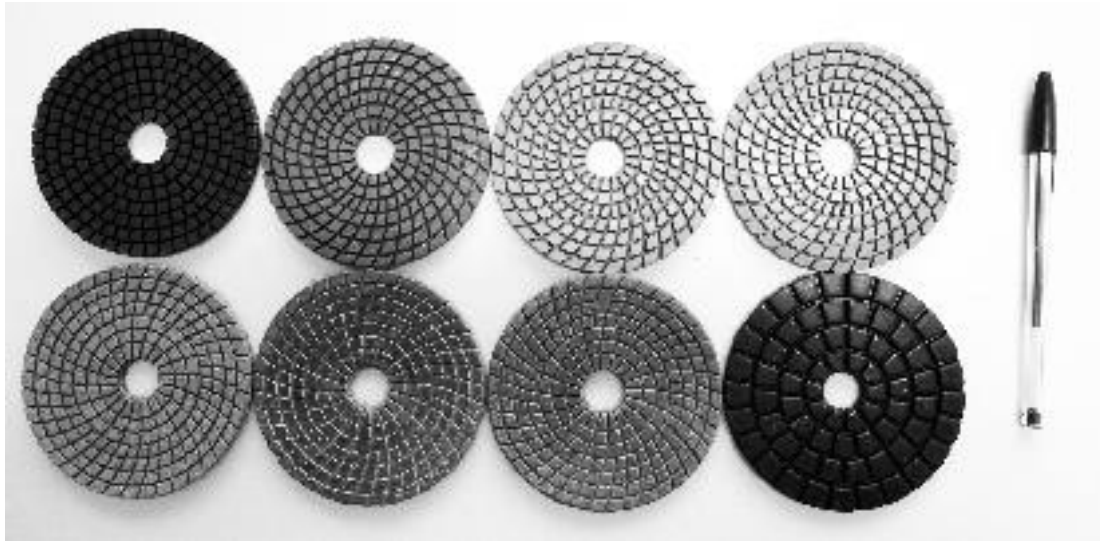


Figura 91 - Exemplos de discos abrasivos utilizadas no acabamento de borda com lixadeira manual. Foto: CETEM/MCTI, 2012.

7. Agradecimentos

Os autores deste capítulo gostariam de agradecer à empresa Cobral Abrasivos Ltda. pela cessão de imagens de rebolos abrasivos, à empresa Flamart Ltda., pelo auxílio na coleta de informação sobre tipos de acabamento superficial, à colega Nuria Castro por algumas imagens, à tecnóloga em rochas ornamentais Abiliane de Andrade Pazeto pelo auxílio na redação do texto referente à marmoraria, aos técnicos de CETEM-ES Jefferson Luiz Camargo e Millena Basílio da Silva pelas sugestões ao texto, ao aluno de Engenharia de Minas do IFES-ES Davi Vargas de Souza pelas contribuições na redação da parte referente aos teares e ao jornalista e professor Carlos Alexandre Gruber de Castro pelas sugestões dadas ao texto.

8. Bibliografia e referências

AGUS, M.; BORTOLUSSI, A.; CICCUI, R. Abrasive performance in rock cutting with AWJ and ASJ. In: Labus T J (ed) 1995 Proc. 8th Amer. Water Jet Conf., Water Jet Techn.Ass., St. Louis. 1995. p. 31-48.

ALENCAR, C.R.A; CARANASSIOS, A.; CARVALHO, D. Tecnologia de lavra e beneficiamento de rochas ornamentais. Instituto Euvaldo Lodi, V.3. Estudo econômico sobre rochas ornamentais, Fortaleza-CE. 1996. 225p.

AMERICAN SOCIETY OF METALS – ASM. Surface engineering for corrosion and wear resistance. Davis & Associates. USA. 2001. 229p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM E 18 Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell superficial of Metallic Materials. 2008. 4p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM E 384 Standard Test Methods for Knoop and Vickers Hardness of Materials. 2011. 3p.

BLASI, P.; COMAZZI, G.; FRISA MORANDINI A.; MARINI, P. Prenormative research concerning the measurement of polish of stone elements. In: 1st International Congress of Natural Stones, Lisboa – Portugal. 1995. p. 19-22.

CENTRO TECNOLÓGICO DO MÁRMORE E GRANITO – CETEMAG. Curso de polidor. Apostila. 2003. 21p.

COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION INC. http://www.copper.org/resources/properties/microstructure/cu_titanium.html, acessado em 04/12/2013. 2013.

CALLISTER, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. Ed. John Wiley & Sons. 2000. 589p.

CAYLESS, M. A. & MARSEDEN, A. M. Lamps and lighting. Edward Arnold, London. 1991. 351p.

DE CAMILLES, E. Insumo indispensável. Pedras do Brasil, nº 30. 2004. p. 65-66.

ERDOGAN, M. Measurements of polished rock surface brightness by image analysis method. In: Engineering Geology 57. 2000. p. 65-72.

GONG, J. & GUAN, Z. Load dependence of low-load hardness in ceramics: a modified PSR model. In: Materials letters, 47. 2001. p. 140-144.

HAWORTH, R. D. The abrasion resistance of metals. Transactions of the A. S. M., v.41. 1949. p. 818-855.

KASCHNER, D. Tecnologias para beneficiamento. In: II Encontro do Centro-Oeste Sobre Granitos, Mármore e Pedras Ornamentais, Goiânia-GO. 1996. 36p.

KRANZ, R. L. Micro cracks in rocks: A Review. In: Tectonophysics, 100. 1983. p. 449-480.

LEE, J. D. Química inorgânica não tão concisa. Editora Edgar Blucher. 1996. 527p.

MACHADO, MARLON ANTONIO; Processos de Beneficiamento – Parte 1 – Apostila do Curso de Especialização em Valorização das Rochas Ornamentais. UFRJ/CETEM/CPRM, 2003.

MOMBER, A. W. & KOVACEVIC, R. Principles of Abrasive Water Jet Machining. ed. Springer. 1998. 394p.

MORAIS, T. L. M. & SUSTER, M. Uso de materiais abrasivos na indústria cerâmica. In: 450 Congresso Brasileiro de Cerâmica. 2001. 12p.

NOBLE, D. N. Abrasive wear resistance of hardfacing weld deposits. In: Metal Construction, v.17, nº9. 1985. p. 605-611.

RABINOWICZ, E. Friction and Wear of materials. Cambridge, Massachusetts, John Wiley. 1966. 243p.

SCOGNAMIGLIO, F. R. Abrasivos mais duros são realmente mais econômicos? In.: Revista Rochas de Qualidade, edição 120, Jan/Fev. 1995. 113p.

SILVEIRA, L. L. L. Polimento de rochas ornamentais: um enfoque tribológico ao processo. Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Depto de Geotecnia. São Carlos, SP. 2007. 217p.

SOUSA, A. A. P. ; RODRIGUES, R. Consumo dos principais insumos do desdobramento de granitos do Nordeste, de diferentes grau de dureza. In: III Seminário de Rochas Ornamentais do Nordeste, 2002, Recife/PE. III Seminário de Rochas Ornamentais do Nordeste, 2002.

SOUZA, D. V.; VIDAL, F. W.; CASTRO, N. F. Estudo comparativo da utilização de teares multilâmina e multifio no beneficiamento de rochas ornamentais. In: Jornada Iniciação Científica, Cetem. Rio de Janeiro - RJ, 2012. 5p.

STACHOWIAK, G.W. & BATCHELOR, A. W. "Engineering tribology". Amsterdam, Elsevier. 1993. 314p.

STELLIN JR, A. Serragens de granitos para fins ornamentais. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Depto de Engenharia de Minas, São Paulo, 1998. 1998. 40p.

TOMITA, Y. & EDA, H. A study of the ultra precision grinding process on a magnetic disk substrate – development of new bonding materials for fixed abrasives of grinding stone. In: Wear 195. 1996. p. 74-80.

TYLCZAK, J. H. Abrasive wear. In: ASM Handbook Friction, lubrication and wear technology. V.18. 1992. p. 184-190.

ZUM-GAHR, K. H. Microstructure and wear of materials. Institute of Materials Technology. University of Siegen, Siegen, Federal Republic of Germany, v.10. 1987.

Capítulo 8

Saúde e segurança no trabalho