**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA**

**INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS DE GRANITOS NO
PROCESSO INDUSTRIAL DE DESDOBRAMENTO DE BLOCOS**

Geól. ROGÉRIO PINTO RIBEIRO

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Geotecnia.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antenor Braga Paraguassú

**São Carlos – SP
2005**

À Inalda, pela compreensão, dedicação e amor constantes e pela companhia em todos os momentos.

Aos meus pais, Fabrício e Ivone, pelo amor, estímulo e pelas orientações em minha vida.
Aos meus irmãos Marcelo e Anelise, pela amizade e incentivo.

AGRADECIMENTOS

A Deus sobre todas as coisas.

À Inalda e aos meus familiares, pelo amor e apoio incondicionais e pela compreensão quando eu estava tão perto e, ao mesmo, tempo tão longe.

Ao orientador Prof. Dr. Antenor Braga Paraguassú, pela amizade nestes anos de convívio e pela incansável dedicação ao longo de todas as etapas de elaboração da tese.

À Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo suporte financeiro que possibilitou a realização desta pesquisa.

Ao Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos, pela infraestrutura oferecida para o programa de pós-graduação e pela oportunidade de aprimoramento profissional.

Aos Professores Doutores Antonio Carlos Artur, José Eduardo Rodrigues e ao Dr. Ely Borges Frazão pelas sugestões, críticas e avaliações.

À Olívia Tirello (Centro Tecnológico do Mármore e Granito), por agilizar visitas técnicas ao parque de beneficiamento de Cachoeiro de Itapemirim/ES e pelo apoio logístico em diversas etapas de campo.

Às empresas Granitos Itabira Ltda. e Granitos Brasileiros S.A., por viabilizarem o acompanhamento operacional de serragem de blocos de granito.

Ao Departamento de Petrologia e Metalogenia do Instituto de Geociências da Universidade Estadual Paulista (Rio Claro), à Dra. Maria Heloísa Frascá e ao MSc. Eduardo Quitete (Divisão de Geologia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo) e a Química Jovanka Goulart (Fundação Parque de Alta Tecnologia / São Carlos), pelo apoio na realização de ensaios tecnológicos.

Aos colegas de “projeto” Sérgio Trajano, Lizandra Nogami, Leonardo Silveira e Clébio Goulart, pelas trocas de informações e pelas sugestões feitas durante o desenvolvimento da pesquisa.

Aos técnicos (Herivelton dos Santos, Benedito de Souza, Antonio Garcia, Décio Lourenço e Antonio Claret) e pessoal de apoio (Maristela Batissaco, Álvaro Nery e Neiva Cardoso) do Departamento de Geotecnia da ESSC/USP que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos amigos geotécnicos, pela agradável convivência neste período.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iv
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
1- INTRODUÇÃO	01
2- PANORAMA DO SETOR DE ROCHAS ORNAMENTAIS	03
2.1- CARACTERÍSTICAS ECONÔMICAS DA INDÚSTRIA DA PEDRA	04
2.2- EMPREGOS DAS ROCHAS PARA FINS ORNAMENTAIS	05
2.3- TECNOLOGIAS DE BENEFICIAMENTO PRIMÁRIO	06
2.3.1- TEARES COM MOVIMENTO PENDULAR	07
2.3.2- TEARES COM MOVIMENTO SEMI-RETILÍNEO	08
2.3.3- TEARES COM CORTE A SECO	08
2.3.4- TALHA-BLOCOS	09
2.3.5- TEARES COM FIO DIAMANTADO	10
2.4- FUNCIONAMENTO DOS TEARES PENDULARES	10
2.4.1- LÂMINAS	10
a) Espessura	11
b) Altura	11
c) Resistência e dureza	11
d) Tipos de lâminas	11
e) Velocidade de descida	12
2.4.2- GRANALHA	12
a) Formas de atuação da granalha	13
2.4.3- POLPA OU LAMA ABRASIVA	14
a) Composição	14
b) Características físico-químicas	14
c) Freqüência e duração das descargas	15
2.5- A MATÉRIA-PRIMA: ROCHA	16
2.5.1- GRANITOS	16
2.5.2- CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	17
2.5.3- PROPRIEDADES DAS ROCHAS E O DESDOBRAMENTO	20
2.5.4- SERRABILIDADE DOS GRANITOS EM TEARES PENDULARES	29
2.6- EQUIPAMENTOS PARA DETERMINAÇÃO DA RUGOSIDADE DE SUPERFÍCIES	32
2.6.1- SISTEMAS QUE FORNECEM DADOS BIDIMENSIONAIS	33
a) Métodos com contato	33
b) Métodos sem contato	37
2.6.2- SISTEMAS QUE FORNECEM DADOS TRIDIMENSIONAIS	40
a) Máquinas tridimensionais de medição	40
b) Fotogrametria	41
c) Interferometria	42
d) Câmeras de mensuração tridimensional de superfícies	43
2.7- CARACTERIZAÇÃO DA TEXTURA SUPERFICIAL DE CHAPAS BRUTAS	43
2.7.1- TIPOS DE IRREGULARIDADES	44
2.7.2- TERMINOLOGIA	45
2.7.3- CARACTERIZAÇÃO DA TEXTURA SUPERFICIAL	45
a) Média aritmética da rugosidade (R_a)	46
b) Altura média do pico-vale (R_z)	46
c) Altura máxima do pico-vale: R_{max} (R_y , R_{ma} ou R_z)	47

d) Amplitude máxima da rugosidade: R_t (R_n , R_d)	47
e) Pico máximo acima da linha média (R_p)	47
f) Altura média dos picos acima da linha central (R_{PM})	47
g) Profundidade da ondulação (W_t)	48
2.7.4- EXEMPLOS DE APLICAÇÃO	48
2.7.5- ANÁLISE ESTATÍSTICA DA SUPERFÍCIE ROCHOSA	49
a) Média Aritmética do perfil	50
b) Variância	50
c) Assimetria de distribuição (<i>Skewness</i>)	51
d) Curtose	51
3. JAZIMENTOS BRASILEIROS DE ROCHAS ORNAMENTAIS E SELEÇÃO DOS TIPOS ESTUDADOS	53
3.1- TIPO DE ROCHAS ESTUDADAS E O CONTEXTO GEOLÓGICO	59
3.2- AMOSTRAGEM E PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	63
4. PROCEDIMENTOS E RESULTADOS DOS ENSAIOS TECNOLÓGICOS	68
4.1 – ENSAIOS RELACIONADOS COM A SERRABILIDADE DOS MATERIAIS ESTUDADOS	69
4.1.1- CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS	69
4.1.2- MICRODUREZA KNOOP	72
4.1.3- ABRASÃO PROFUNDA	74
4.1.4- COEFICIENTE DE ATRITO DINÂMICO	75
4.1.5- RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO (AMSLER)	78
4.1.6- RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL	79
4.2 – OUTROS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	80
4.2.1- ÍNDICES FÍSICOS	81
4.2.2- VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS	81
4.2.3- COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA LINEAR	82
4.2.4- RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	82
4.2.5- RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE CORPO DURO	84
5. DETERMINAÇÃO DA RUGOSIDADE DAS CHAPAS BRUTAS	86
5.1 – INTRODUÇÃO	86
5.2 – SISTEMAS DE MEDIÇÃO	87
5.3 – PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM RUGOSÍMETRO PORTÁTIL	87
5.3.1.- MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE	89
5.4 – ACOMPANHAMENTO DA OPERAÇÃO DE SERRAGEM	89
5.5 – CORRELAÇÕES ENTRE RUGOSIDADE E PROPRIEDADES ÍNDICES	101
6. CONCLUSÕES	104
6.1 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	105
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 -	Tear moderno de grande porte. Empresa Marbrasa (Cachoeiro de Itapemirim/ES).	08
FIGURA 2.2 -	Ecotear (corte a seco) em exposição no estande da empresa Fundisa S.A. durante a XVII Feira Internacional do Mármore e Granito (FIMAG), Cachoeiro de Itapemirim/ES.	09
FIGURA 2.3 -	Talha-blocos para a produção de ladrilhos (Granitos Brasileiros S.A.).	09
FIGURA 2.4 -	Tear multifios diamantados para corte de granito. Empresa Marmocil (Serra/ES).	10
FIGURA 2.5 -	Tipos de lâminas usadas na serragem de granitos: (A) lisas; (B) com sulcos verticais e (C) com sulcos inclinados (modificado de CETEMAG, 2003).	11
FIGURA 2.6 -	Esquema de desgaste a três corpos (ZUM-GAHR, 1987).	13
FIGURA 2.7 -	Visualização de microimpressão produzida por carga de 200gf em amostra de cobre (Foto do autor).	19
FIGURA 2.8 -	Comportamento mecânico do quartzo em prova de incisão (BERRY <i>et al.</i> , 1989).	22
FIGURA 2.9 -	Métodos disponíveis de mensuração da rugosidade (modificado de GRASSELLI, 2001).	32
FIGURA 2.10 -	Componentes de um perfilômetro mecânico (NOVASKI, 1994).	33
FIGURA 2.11 -	Ilustração de perfilômetro utilizado na medição da rugosidade de amostras de chapas brutas de granitos (SPÍNOLA, 1998).	34
FIGURA 2.12 -	(A) Visualização de rugosímetro utilizado por MARTÍN CORTÉZ (2003) e (B) detalhe mostrando a varredura do estilete em amostra do granito Preto Piracaia.	35
FIGURA 2.13 -	(A) Esquema do “Bow-meter” e (B) Medição do abaulamento de placas de mármore em ambiente externo (TEAM, 2000, 2004).	36
FIGURA 2.14 -	Exemplo do padrão de abaulamento em fachadas do Banco Nacional de Copenhague, Dinamarca (SCHOUENBERG, 2003).	37
FIGURA 2.15 -	Perfilômetro laser utilizado pelo Laboratório de Tribologia e Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (MELLO & TRINDADE, 1997).	38
FIGURA 2.16 -	Equipamento pneumático utilizado para avaliação da qualidade superficial de rochas (KAINER <i>et al.</i> , 1996).	39
FIGURA 2.17 -	Máquina de medição tridimensional utilizada por SILVA (1998).	40
FIGURA 2.18 -	Exemplos de figuras e respectivos perfis de rugosidade obtidos por meio de método fotogramétrico (SEKER & TAVIL, 1996).	42
FIGURA 2.19 -	Tipos de irregularidades superficiais: D - Defeitos; O - Ondulação e R – Rugosidade (FRISA MORANDINI & OGGERI, 1992).	44
FIGURA 2.20 -	Terminologia adotada para a caracterização da rugosidade superficial de chapas brutas de granitos (SPÍNOLA, 1998).	45
FIGURA 2.21 -	Definição do parâmetro média aritmética da rugosidade - R_a (SANDVIK, 1994 <i>apud</i> SPÍNOLA, 1998).	46
FIGURA 2.22 -	Definição do parâmetro altura média do pico-vale - R_z (SANDVIK, 1994 <i>apud</i> SPÍNOLA, 1998).	46
FIGURA 2.23 -	Definição do parâmetro altura máxima do pico-vale - R_{max} (SANDVIK, 1994 <i>apud</i> SPÍNOLA, 1998).	47
FIGURA 2.24 -	Definição do parâmetro amplitude máxima da rugosidade - R_t (SANDVIK, 1994 <i>apud</i> SPÍNOLA, 1998).	47
FIGURA 2.25 -	Definição do parâmetro altura média dos picos acima da linha central (SANDVIK, 1994 <i>apud</i> SPÍNOLA, 1998).	48
FIGURA 2.26 -	Definição do parâmetro profundidade de ondulação - W_t (SANDVIK, 1994 <i>apud</i> SPÍNOLA, 1998).	48

FIGURA 2.27 -	Curva de distribuição de amplitudes (MUMMERY, 1992).	50
FIGURA 2.28 -	Variância de duas curvas de distribuição das amplitudes (MUMMERY, 1992).	50
FIGURA 2.29 -	Assimetria de duas curvas de distribuição de amplitudes (MUMMERY, 1992).	51
FIGURA 2.30 -	Curtose de duas curvas de distribuição de amplitudes (MUMMERY, 1992).	52
FIGURA 3.1 -	Províncias geológicas e alguns jazimentos de rochas ornamentais do Brasil (modificado de MENDES, 2002).	57
FIGURA 3.2 -	Domínios tectono-estruturais no Cinturão Móvel Ribeira - CMR (modificado de VIEIRA, 1997),	62
FIGURA 3.3 -	Frente de extração do granito Preto Indiano, situada entre as cidades de Vargem Alta e Iconha/ES.	64
FIGURA 3.4 -	Frente de extração do Ocre Itabira. Região montanhosa próxima à cidade de Venda Nova dos Imigrantes/ES.	64
FIGURA 3.5 -	Funcionamento do Extrator portátil emprestado pela EESC-USP para obtenção de corpos de prova cilíndricos (diâmetros de 70mm e 30mm) nas instalações das empresas de beneficiamento (Cachoeiro de Itapemirim/ES).	65
FIGURA 3.6 -	Aplainamento dos corpos de prova cilíndricos realizado em torno mecânico do Departamento de Geotecnia (EESC/USP).	65
FIGURA 3.7 -	Corte dos corpos de prova cilíndricos em serra circular. Departamento de Geotecnia (EESC/USP).	66
FIGURA 3.8 -	Equipamento utilizado para se atingir o paralelismo dos topos e bases das amostras (EESC/USP).	66
FIGURA 3.9 -	Fresa mecânica adaptada para o aplainamento e paralelismo das superfícies de corpos de prova prismáticos (EESC/USP).	67
FIGURA 3.10 -	Detalhe mostrando o aparato de fixação da amostra. Observar funcionamento de coroa diamantada.	67
FIGURA 4.1 -	(A) aspecto macroscópico do ladrilho submetido ao ensaio de coloração seletiva de feldspatos e (B) fotomicrografia do migmatito “Preto Indiano”.	70
FIGURA 4.2 -	(A) aspecto macroscópico do ladrilho submetido ao ensaio de coloração seletiva de feldspatos e (B) fotomicrografia do sienogranito “Vermelho Brasília”.	71
FIGURA 4.3 -	(A) aspecto macroscópico do ladrilho submetido ao ensaio de coloração seletiva de feldspatos e (B) fotomicrografia do charnockito “Verde Labrador”.	72
FIGURA 4.4 -	(A) esquema das quarenta impressões realizadas em cada corpo-de-prova (IPT) (B) impressão em cristal de quartzo do sienogranito “Vermelho Brasília”.	73
FIGURA 4.5 -	(A) abrasímetro disponibilizado pelo Parque de Alta Tecnologia de São Carlos (PARQTEC) e (B) detalhe mostrando o disco rotativo tangenciando o corpo-de-prova.	74
FIGURA 4.6 -	(A) Medida do comprimento da cavidade (Ccav) e (B) Detalhe mostrando as cavidades impressas (material removido no ensaio) em amostra do migmatito “Preto Indiano”.	75
FIGURA 4.7 -	Disposição dos ladrilhos do migmatito “Preto Indiano” para determinação do coeficiente de atrito dinâmico com “scivolosímetro”(PARQTEC).	77
FIGURA 4.8 -	Bloco esquemático de rocha movimentada (sem escala), orientado de acordo com a programação de serragem. Observar as direções de amostragem dos corpos de prova para determinação da resistência à compressão uniaxial.	79

FIGURA 4.9 -	Bloco esquemático de rocha movimentada (sem escala), orientado de acordo com a programação de serragem. Observar as direções de amostragem dos corpos de prova para determinação da velocidade de propagação de ondas.	82
FIGURA 4.10 -	Bloco esquemático de rocha movimentada (sem escala), orientado de acordo com a programação de serragem. Observar as direções de amostragem dos corpos de prova para determinação da resistência à tração na flexão.	83
FIGURA 5.1 -	Visão geral do “ <i>Avaliador de Rugosidade de Chapas – ARC</i> ” devidamente posicionado sobre uma chapa bruta de granito.	88
FIGURA 5.2 -	(A) Perfil medido e (B) perfil horizontalizado (Mummery, 1992).	89
FIGURA 5.3 -	Utilização de guincho no transporte de chapa bruta de granito serrada em tear para posterior medição de sua rugosidade. Granitos Brasileiros S.A. (Guarulhos/SP).	91
FIGURA 5.4 -	Detalhe mostrando a utilização de ponte rolante para disposição da chapa (mostrada anteriormente) em bancada. Setor de serragem da Granitos Brasileiros S.A. (Guarulhos/SP).	91
FIGURA 5.5 -	Execução de medidas de rugosidade diretamente na superfície de chapa bruta de granito com a utilização do ARC. Granitos Brasileiros S.A. (Guarulhos/SP).	92
FIGURA 5.6 -	(A) fotomicrografia do monzogranito Champagne Realengo; (B) aspecto macroscópico do ladrilho submetido ao ensaio de coloração seletiva de feldspatos.	93
FIGURA 5.7 -	(A) fotomicrografia do sienogranito Vermelho Capão Bonito; (B) aspecto macroscópico do ladrilho submetido ao ensaio de coloração seletiva de feldspatos.	94
FIGURA 5.8 -	Blocos do Vermelho Capão Bonito (carga N° 2220) sendo serrados em tear multilâminas MGM (modelo Jumbo G4). Empresa Granitos Brasileiros (Guarulhos/SP).	96
FIGURA 5.9 -	Visualização da carga do granito Champagne Realengo. Posição das chapas selecionadas para a medição da rugosidade superficial: (E) esquerda; (C) central e (D) direita.	97
FIGURA 5.10 -	Detalhe da chapa E (esquerda), mostrada na foto anterior. Observar o posicionamento dos perfis de rugosidade medidos: AB - perfil central (CEN); DE – perfil de fundo (FUN) e FG – perfil da parte frontal da chapa (FRE).	98
FIGURA 5.11 -	Perfil de rugosidade de chapa bruta do granito “Champagne Realengo”	100
FIGURA 5.12	Relação entre amplitude máxima da rugosidade (Rt) e resistência à compressão uniaxial.	102
FIGURA 5.13	Relação entre amplitude máxima da rugosidade (Rt) e resistência ao desgaste abrasivo.	102
FIGURA 5.14	Relação entre amplitude máxima da rugosidade (Rt) e coeficiente de atrito dinâmico.	103

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 -	Composição, peso específico e viscosidade das polpas abrasivas (modificados de PERFETTI <i>et al.</i> , 1993 e STELLIN JÚNIOR, 1998).	15
TABELA 2.2 -	Dados de desgaste abrasivo e dureza Knoop apresentados por MANCINI & FRISA MORANDINI (1982).	24
TABELA 2.3 -	Dureza Vickers Equivalente e serrabilidade de granitos com discos diamantados (modificado de NEGRI, 1996).	26
TABELA 2.4 -	Relação entre serrabilidade em teares com dureza Knoop (modificado de FORNASERO <i>et al.</i> , 1988).	27
TABELA 2.5 -	Relação entre serrabilidade, resistência à compressão e resistência à tração de alguns granitos italianos (CITRAN, 2000).	28
TABELA 2.6 -	Quantidades relativas de granalha, viscosidade e velocidade de descida em função do tipo de material (PERFETTI <i>et al.</i> , 1992).	30
TABELA 2.7 -	Serrabilidade de granitos beneficiados em serrarias italianas (CITRAN, 2000).	31
TABELA 2.8 -	Dados de produção de serrarias italianas e a serrabilidade dos granitos (CITRAN, 2000).	31
TABELA 2.9 -	Classificação das irregularidades de uma superfície (modificado de Frisa Morandini & Oggeri, 1992 e Blasi <i>et al.</i> , 1995).	44
TABELA 3.1 -	Produção brasileira de rochas ornamentais em 2002 (CHIODI FILHO, 2003a).	53
TABELA 3.2 -	Produção de Rochas por Regiões e Estados Brasileiros (CHIODI FILHO, 2004a).	54
TABELA 3.3 -	Jazimentos de rochas ornamentais do Brasil (modificado de MENDES, 2002).	58
TABELA 3.3 -	Jazimentos de rochas ornamentais do Brasil (modificado de MENDES, 2002); continuação.	59
TABELA 3.4 -	Relação dos tipos rochosos selecionados e regiões produtoras.	61
TABELA 4.1 -	Resultados de dureza Knoop das amostras estudadas.	73
TABELA 4.2 -	Determinações dos valores da resistência à abrasão profunda.	76
TABELA 4.3 -	Classificação do coeficiente de atrito dinâmico (NBR 13818).	77
TABELA 4.4 -	Valores médios de coeficiente de atrito dos granitos em superfície seca e molhada.	77
TABELA 4.5 -	Resultados dos ensaios de resistência ao desgaste abrasivo (Método Amsler).	78
TABELA 4.6 -	Resultados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial.	80
TABELA 4.7 -	Sumário dos valores médios dos ensaios diretamente relacionados com a serrabilidade dos granitos estudados.	80
TABELA 4.8 -	Resultados obtidos de índices físicos.	81
TABELA 4.9 -	Resultados da determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas corpos de prova pré e pós determinação do coeficiente de dilatação térmica linear.	82
TABELA 4.10 -	Resultados do ensaio de dilatação térmica linear (NBR 12765).	83
TABELA 4.11 -	Determinação dos valores da resistência de tração na flexão.	84
TABELA 4.12 -	Resultados da determinação da resistência ao impacto de corpo duro.	84
TABELA 4.13 -	Valores médios dos ensaios de caracterização tecnológica dos “granitos” Preto Indiano, Vermelho Brasília e Verde Labrador.	85
TABELA 5.1 -	Resultados da Dureza Knoop, Desgaste Amsler e Abrasão profunda dos “granitos” Champagne Realengo e Vermelho Capão Bonito.	94
TABELA 5.2 -	Dados operacionais da serragem das cargas dos “granitos” Champagne Realengo e Vermelho Capão Bonito.	95
TABELA 5.3 -	Dados estatísticos de perfis de rugosidade medidos pelo “Avaliador de Rugosidade de Chapas”	99
TABELA 5.4 -	Sumário dos valores médios dos ensaios e da rugosidade de chapas dos granitos selecionados.	101

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AA	Absorção d'água
AP	Abrasão Profunda
ARC	Avaliador de Rugosidade de Chapas
CAD	Coeficiente de Atrito Dinâmico
C_{cav}	Comprimento da cavidade
CETEMAG	Centro Tecnológico do Mármore e Granito
CP	Corpo de Prova
CDTL	Coeficiente de Dilatação Térmica Linear
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
F	Força de ruptura
HK	Dureza Knoop
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
IS	Índice de Serrabilidade
L	Comprimento de Avaliação
L_N	Comprimento da amostra
L₀	Comprimento inicial do corpo de prova
L_t	Comprimento Total
M	Linha Média ou Central
MEAS	Massa Específica Aparente Seca
MDV_{eq}	Dureza Vickers Equivalente
m1	Primeiro momento da função de probabilidade de distribuição de amplitudes
m2	Segundo momento da função de probabilidade de distribuição de amplitudes
m3	Terceiro momento da função de probabilidade de distribuição de amplitudes
m4	Quarto momento da função de probabilidade de distribuição de amplitudes
P	Perfil de Superfície
PA	Porosidade Aparente
Parqtec	Fundação Parque de Alta Tecnologia de São Carlos
R_a	Parâmetro Média Aritmética da Rugosidade
RCU	Resistência à Compressão Uniaxial
RDA	Resistência ao Desgaste Abrasivo (Amsler)
R_{max}	Parâmetro Altura Máxima do Pico-Vale
R_p	Parâmetro Pico Máximo Acima da Linha Média
R_{PM}	Parâmetro Altura Média dos Picos Acima da Linha Central
R_t	Parâmetro Amplitude Máxima da Rugosidade
RTF	Resistência à Tração na Flexão
R_z	Parâmetro Altura Média do Pico-Vale
UNESP	Universidade Estadual Paulista
USP	Universidade de São Paulo
V	Serrabilidade
V	Volume de material removido
V_p	Velocidade de Propagação de Ondas
W_t	Parâmetro Profundidade de Ondulação
μ	Coeficiente de atrito

RESUMO

RIBEIRO, R.P. (2005). *Influência das Características Petrográficas de Granitos no Processo Industrial de Desdobramento de Blocos*. São Carlos. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 120p.

O desdobramento de blocos de granitos, em teares multilâminas, é uma das mais complexas operações da Indústria da Pedra. A qualidade das superfícies das chapas obtidas no processo de serragem (rugosidade) determina o tempo e os insumos gastos nas operações posteriores de polimento, implicando diretamente no custo final. Embora o Brasil seja um dos maiores produtores mundiais de granitos ornamentais (quatro milhões de m²/mês de placas), surpreendentemente, não se têm na literatura científica trabalhos que dão o devido destaque às *propriedades intrínsecas dos granitos* no processo de serragem. A presente pesquisa tem como objetivo principal correlacionar parâmetros petrográficos com as características físicas e mecânicas de granitos, dando ênfase ao estudo da influência da mineralogia e da anisotropia textural/estrutural, com vistas à melhor orientação desta etapa industrial. Foram escolhidos tipos de granito consagrados comercialmente e acompanhados os desdobramentos de blocos para medidas diretas da rugosidade das superfícies serradas com o auxílio de um equipamento especialmente construído para esta finalidade. Os resultados mostraram que os aspectos texturais (granulação, arranjo, imbricação, grau de microfissuramento) e de alteração dos minerais são os responsáveis pelas diferenças na rugosidade das chapas e na velocidade de processamento.

PALAVRAS-CHAVE: serragem de blocos, granitos, textura, rugosidade superficial.

ABSTRACT

RIBEIRO, R.P. (2005). *Influência das Características Petrográficas de Granitos no Processo Industrial de Desdobramento de Blocos*. São Carlos. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 120p.

The sawing of granites blocks using multiblade gangsaws is one of the most complex operations in the stone processing industry. The slab surface quality (roughness) obtained after the sawing process determines the time and the inputs required in subsequent polishing operations and thus has a direct implication on the final product cost. Although Brazil is one of the largest world producers of ornamental granites (four million m²/month of slabs), it is surprising to note that there are very little or no scientific literature works available that address major aspects of the intrinsic properties of granites and their role during the sawing process. The present research has the major objective of correlating petrographic parameters with physical and mechanical characteristics of granites with a major emphasis on the role played by mineralogy and textural/structural anisotropy focusing mainly on how to obtain the best orientation during this industrial stage. The samples used are the most widely used granite of high commercial value in Brazil. The sawing process was monitored and subsequent direct measures of the roughness of the sawed surfaces carried out using an equipment specially built for this purpose. The results obtained show that textural (granulation, arrangement, imbrication, degree of microcracking) and alteration aspects of the minerals are responsible for the observed differences in slab roughness and processing speed.

KEY-WORDS: Block sawing, granites, texture, surface roughness.

1. INTRODUÇÃO

As rochas ornamentais, além de proporcionar beleza e durabilidade às edificações, inserem-se em um importante setor da economia em diversos países. O Brasil é um dos principais exportadores mundiais, produz cerca de 4 milhões de m²/mês de chapas e de acordo com MONTANI (2005) dispõe de 500 tipos de rochas ornamentais com boa aceitação no mercado internacional. Possui o segundo maior parque industrial para a serragem de rochas (1.300 teares em operação), onde os cortes dos blocos são feitos essencialmente em teares multilâminas que utilizam granalha de aço como elemento abrasivo.

As exportações brasileiras nos últimos anos vêm registrando sucessivos acréscimos resultantes da melhoria dos equipamentos e das técnicas operacionais, dentre elas um fator importante foi o aprimoramento do processo de controle da lama abrasiva nas micros e pequenas serrarias.

Os países desenvolvidos que atuam de forma marcante na indústria da pedra, além de terem tradição no setor, apresentam o domínio das técnicas de extração, beneficiamento e produção de equipamentos. O Brasil, apesar de ter apresentado uma significativa melhora na qualidade operacional de seus parques industriais, ainda não tem atentado para a importância de desenvolver, de uma forma mais intensa, pesquisas nesse importante setor produtivo.

Para a otimização do processo e conseqüentemente ganho de produtividade, é de suma importância que se considere a rocha “realmente como um produto natural”, lembrando que na sua “produção” ou seja na sua gênese, não existe controle de qualidade. Trata-se, portanto, de um material com diversidade em suas características e que necessita de um controle tecnológico desde da lavra até o lustro.

A serragem em teares multilâminas envolve uma operação muito complexa, pouco entendida e que ainda não é tratada dentro de um sistema tribológico de desgaste a três corpos (rocha, abrasivo e lâmina). Mesmo com o avanço tecnológico verificado nos equipamentos, surpreendentemente nota-se a quase inexistência de trabalhos que vinculam as propriedades intrínsecas dos granitos ornamentais, com a sua serrabilidade (FORNASERO *et al.*, 1988; ROSSI *et al.*, 1997; FACHADA, 1999; CITRAN, 2000, 2002).

Isto foi constatado principalmente em participações em feiras internacionais de rochas ornamentais de 2003 a 2005 e no I Congresso Internacional de Rochas Ornamentais, que

ampliaram as informações sobre os últimos equipamentos para a industrialização de rochas ornamentais e deram maior suporte para a presente pesquisa.

Ela tem como objetivo principal correlacionar parâmetros petrográficos com as características físicas e mecânicas de granitos, dando ênfase ao estudo da influência da mineralogia e da anisotropia textural/estrutural, com vistas à melhor orientação do processo de serragem.

A tese se inicia com uma abordagem multidisciplinar do desdobramento de blocos de granitos em teares multilâminas, os tipos de equipamentos, os insumos e a serrabilidade dos materiais rochosos (CAPÍTULO 2), discutindo por um lado a dificuldade de agregar dados da indústria e por outro a escassez de informações com tratamento científico.

O CAPÍTULO 3 sintetiza a geologia do território brasileiro, as ocorrências de rochas ornamentais e os aspectos práticos e condicionamentos geológicos da exploração. Foram selecionados os tipos de granitos que permitiram estudar as fases de beneficiamentos, assim como facilidades na coleta de amostras para ensaios de caracterização tecnológica.

No CAPÍTULO 4 são apresentados os resultados tanto dos ensaios mais importantes para o estudo da serrabilidade de rochas ornamentais como dos demais ensaios de caracterização tecnológica.

No CAPÍTULO 5 encontram-se as informações do processo operacional de serragem nas empresas, obtido pelo acompanhamento desde a seleção dos blocos até o desdobramento final das chapas. São verificadas as relações entre a velocidade de corte de granitos e a qualidade (rugosidade) das superfícies das chapas obtidas por meio de um equipamento especialmente desenvolvido para este fim.

Uma abordagem dos vários fatores envolvidos na serragem de granitos em teares multilâminas, cuja relação rocha x equipamentos ainda é pouco conhecida, é apresentada no CAPÍTULO 6, juntamente com sugestões para trabalhos futuros.

A tese foi desenvolvida na Escola de Engenharia de São Carlos (USP), contando com o apoio das seguintes instituições: Instituto de Geociências da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Fundação Parque de Alta Tecnologia de São Carlos (PARQTEC), Divisão de Geologia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) e Centro Tecnológico do Mármore e Granito (CETEMAG). A interação com empresas beneficiadoras de rochas, dentre elas a Granitos Itabira Ltda. (Cachoeiro de Itapemirim / ES) e a Granitos Brasileiros S.A. (Guarulhos / SP) foi decisiva na realização desta pesquisa, que é de cunho teórico, prático e industrial, cujo desenvolvimento requereu amplos estudos laboratoriais associados ao acompanhamento integral de cortes de blocos nas empresas.

2 – PANORAMA DO SETOR DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Apresenta a parte conceitual e prática da serrabilidade de granito, os equipamentos utilizados e a interação das características intrínsecas da rocha com os diversos insumos utilizados. Tem como objetivo fundamentar e embasar o desenvolvimento correto da pesquisa e foi facilitada tanto pelo acompanhamento do processo de serragem nos teares em serviço das empresas Emigran, Granita, Marbrasa, Marcel e Moredo, como pela participação nos cursos de técnicas de serragem, de polimento e *blaster*, realizados no Centro Tecnológico do Mármore e Granito (CETEMAG).

São abordados os seguintes tópicos: Características Econômicas da Indústria da Pedra; Produtos das Rochas Ornamentais; Tecnologias de Beneficiamento Primário; Funcionamento dos Teares, Matéria Prima - *Rocha* e Caracterização da Textura Superficial. Nesta última, abre-se uma linha de investigação de todos os equipamentos existentes para serem utilizados na determinação da rugosidade de chapas brutas de granitos obtidas após a serragem de blocos nos teares multilâminas, fundamentando o desenvolvimento de projeto de um equipamento específico para esta finalidade, que é apresentado no CAPÍTULO 5.

As rochas ornamentais e de revestimento, também designadas rochas lapídeas, rochas dimensionais e materiais de cantaria, abrangem os tipos litológicos que podem ser extraídos em blocos ou placas, cortados em formas variadas e beneficiados através de esquadrejamento, polimento, lustro, etc.

Do ponto de vista comercial, são subdivididas basicamente em *mármore*s e *granitos*, numa designação mais ampla do que os termos petrológicos tradicionais (BRANDÃO *et al.*, 1991). Os *mármore*s englobam todas as rochas carbonatadas, enquanto que os *granitos* abrangem, genericamente, as rochas silicatadas (granitos, sienitos, charnoquitos, gabros, basaltos, arenitos, dioritos, etc.). Alguns outros tipos litológicos, incluídos no campo das rochas ornamentais, são os quartzitos, serpentinitos e ardósias, também muito importantes setorialmente.

O aspecto estético é o principal condicionante para o uso das pedras de revestimento. Conjugado a este fator, devem ser consideradas as características tecnológicas da rocha, a

tipologia do jazimento, bem como os possíveis defeitos decorrentes das etapas de extração e de beneficiamento (FRASCÁ & QUITETE, 2000). Em conjunto, estas características condicionam a qualificação das rochas para os diferentes usos. FRAZÃO & PARAGUASSU (1998) fizeram um apanhado das funções que as rochas devem ter para utilização em revestimentos verticais de exteriores e interiores e também em piso de edificações, apresentando os requisitos de qualidade para que possam apresentar bom desempenho.

O Brasil apresenta um enorme potencial geológico para mármore e, especialmente, granitos de diferentes padrões estéticos, homogêneos e movimentados. Atualmente, ocupa o quinto lugar na produção mundial de blocos destes tipos rochosos. Contudo, sua participação neste mercado se faz, na maioria das vezes, como produtor de matéria-prima.

Entretanto, no I Congresso Internacional de Rochas Ornamentais realizado em 2.005 na cidade de Guarapari/ ES e na XVI Feira Internacional de Vitória/ES realizada no mesmo ano, verificou-se um esforço, cada vez maior, na implantação de uma política para o aumento do valor agregado na comercialização das rochas ornamentais brasileiras, principalmente as consideradas “exóticas”.

Outros aspectos fundamentais para o aumento da competitividade do setor de lavra e de beneficiamento de rochas ornamentais brasileiro são destacados por VILLASCHI & SABADINI (2000) e CARANASSIOS (2001): (i) domínio das técnicas de avaliação e caracterização tecnológica de jazidas; (ii) escolha de tecnologias adequadas de beneficiamento aos diferentes tipos de rocha; (iii) uniformidade e garantia de qualidade de produtos, normas técnicas e minimização do impacto ambiental e (iv) preparação de recursos humanos e um esforço agressivo de *marketing*.

Isto nos mostra que, além de equipamentos modernos, as empresas envolvidas neste exigente mercado devem investir em pesquisas que proporcionem a assimilação de *know-how* adequado, em especial ao longo das etapas de beneficiamento das diferentes rochas ornamentais.

O desdobramento de blocos de granito é quase que totalmente realizado com teares multilâminas e configura uma das mais complexas operações que envolvem a indústria da rocha ornamental. Neste sentido, estudos que abordem a interação entre os fatores influentes na serragem da rocha, tais como as suas características intrínsecas, o controle do processo e dos insumos, e a qualidade do acabamento superficial dos produtos obtidos (as chapas) virão a constituir uma contribuição de grande valia para o setor.

2.1 - CARACTERÍSTICAS ECONÔMICAS DA INDÚSTRIA DA PEDRA

As rochas ornamentais e de revestimento constituem uma das áreas mais promissoras no setor mineral, com um crescimento médio de produção mundial ao longo dos anos 90 estimado

em 6% ao ano, período considerado como a nova *idade da pedra* e, que no Brasil, foi um dos poucos setores da economia que apresentou um crescimento nas taxas anuais de produção.

A produção mundial de rochas ornamentais evoluiu de 1,5 milhões toneladas/ano na década de 20, para um patamar de 75,0 milhões toneladas/ano em 2003 (MONTANI, 2004). Este incremento deve-se, principalmente, ao avanço tecnológico nos setores de extração, de beneficiamento e de aplicação das rochas, permitindo soluções seguras, estéticas e funcionais para a construção civil. A modernização do setor também possibilitou a inclusão no mercado de tipos rochosos anteriormente não comercializados.

A comercialização no setor de rochas ornamentais dá-se sob a forma de materiais brutos e produtos acabados/semi-acabados, movimentando em 2001 pelo menos US\$ 40 bilhões no mercado internacional. De acordo com ABIROCHAS (2001), os materiais brutos possuem menor valor na comercialização, sendo a média de preço para blocos de mármore e de granitos entre US\$ 400,00/m³ e US\$ 1.200,00/m³ e o preço do material beneficiado (produto final) oscilam entre US\$ 30,00/m² e US\$ 60,00/m².

Com 3.200.000 toneladas de material lavrado em 2003, o Brasil colocou-se como o sétimo produtor mundial de rochas ornamentais. Cerca de 819.000 toneladas de produtos silicáticos foram exportados em estado bruto, sendo os principais países compradores: Itália (248.000 toneladas), China (132.000 toneladas) e Espanha (130.000 toneladas), secundariamente Estados Unidos da América (78.000 toneladas), Taiwan (68.000 toneladas) e França (40.000 toneladas), e referidos em MONTANI (*op.cit.*).

De acordo com CHIODI FILHO (2003b,2003c,2005), tem ocorrido um considerável aumento das exportações brasileiras de rochas ornamentais nos últimos anos. Em 2004, o aumento de 40% nas exportações representou um montante de aproximadamente US\$ 601 Milhões, com uma tendência de diminuição de exportações de blocos, reflexo da competitividade crescente da indústria brasileira de transformação.

No mercado mundial, em 2003, o Brasil colocou-se como sexto maior exportador de rochas em volume físico, o segundo de granitos brutos, o décimo de rochas processadas simples, o sexto de rochas processadas especiais e o segundo de ardósias.

Dentre os estados brasileiros que trabalham com rochas ornamentais o Espírito Santo é, de longe, o mais importante. Segundo SINDIROCHAS (2005), possui cerca de 400 frentes de lavras (35% do total de pedreiras existentes no Brasil) e responde por quase que a metade da produção nacional, tendo exportado em 2.002 um total de 49,75% de rocha processada.

2.2 - PRODUTOS DAS ROCHAS ORNAMENTAIS

Desde os tempos pré-históricos, as rochas têm sido utilizadas para os mais diversos fins. Elas viriam a ser usadas com função estética e ornamental ao redor de 3.000 a.C. pelos

mesopotâmios e egípcios e, posteriormente, pelos gregos, que difundiram seu emprego por meio da escultura e da arquitetura. Finalmente os romanos consolidaram seu uso nas mais audaciosas obras públicas da antigüidade. Por volta do ano 80 a.C. eles começaram a utilizar em revestimento de grandes construções de tijolos, principalmente por motivos estéticos e para dar a estas obras um aspecto opulento e duradouro. Tornaram-se os pioneiros nesta modalidade.

Naquela época, Roma explorava o mármore travertino, em ocorrência próxima à cidade (Tivoli). Posteriormente, a exploração foi deslocada para as Montanhas Apuanas, tendo como centro mundial de produção a região de Carrara, cuja tradição na exploração subterrânea e a céu aberto do mármore perdura até os dias atuais.

A expansão comercial das rochas ornamentais e a decorrente diversificação de suas formas se deram com o processo gradual de mecanização da indústria de extração e de beneficiamento no início do século XX. Desde então, em função da combinação de suas qualidades estruturais e estéticas, elas constituem um importante produto em diversas áreas.

Atualmente, as aplicações das rochas ornamentais são consideradas quase que ilimitadas e, segundo ALENCAR *et al.* (1996), podem ser reunidas em quatro principais grupos: Arquitetura e construção (grupo de maior expressão financeira), Construção e revestimento de elementos urbanos, Arte funerária, Arte e Decoração

Esta diversidade de aplicação das rochas ornamentais gera um conjunto de produtos extremamente amplo, mas que podem ser resumidos em seis tipos principais: blocos, chapas, placas para revestimentos de paredes e/ou fachadas, ladrilhos modulares, revestimento de escadas e de pisos e obras dimensionais ou manufaturados. Cerca de 69,5% da produção mundial de mármore e de granito é utilizada principalmente na forma de pisos e revestimentos em construções, 17,5% em arte funerária, 9,5% em trabalhos estruturais e 3,5% em outros casos (MONTANI, 2004).

Em qualquer tipo de aplicação, o ciclo produtivo pode ser dividido em quatro etapas bem definidas: pesquisa mineral, extração, os beneficiamentos primário e secundário.

O beneficiamento primário (serragem ou desdobramento), que é objeto da presente pesquisa, constitui a primeira etapa do processo de industrialização das rochas ornamentais (ALENCAR, *op.cit.*; KASCHNER, 1996). Os blocos obtidos da etapa anterior (extração) são cortados em chapas, tiras ou espessores, com espessuras próximas daquelas que terão os produtos finais. Para isso são utilizados equipamentos específicos como teares, talha-blocos de disco diamantado ou máquinas de corte a fio diamantado (monofios).

2.3 - TECNOLOGIAS DE BENEFICIAMENTO PRIMÁRIO

Em geral, os blocos extraídos nas pedreiras têm volume variável entre 5m³ e 8m³, podendo atingir, excepcionalmente, 12m³. Todavia, materiais especiais com alto valor comercial

permitem o aproveitamento de blocos a partir de 1m³. Após o esquadrejamento feito na própria pedreira, ou após ter sido refilado com máquina monolâmina ou por meio do fio diamantado, o bloco é encaminhado à serraria para ser beneficiado.

A serragem de blocos realizada com teares é a mais tradicional e amplamente difundida, independentemente do material a ser processado, principalmente por conjugar elevada produtividade e maior flexibilidade produtiva (ao gerar uma ampla gama de produtos finais a partir das chapas).

Ela se dá pela ação de um elemento abrasivo conduzido por um conjunto de lâminas movimentadas pelo tear que, de forma simplificada, pode ser descrito como um equipamento constituído de uma estrutura de sustentação formada por quatro colunas que suportam o quadro onde se localizam as lâminas. Estas são dispostas e tensionadas longitudinalmente ao maior comprimento do bloco de rocha. Um mecanismo biela-manivela deflagra um movimento alternado, responsável pelo atrito entre as lâminas, a lama abrasiva e a rocha. Ao mesmo tempo, o quadro porta-lâminas é pressionado contra o bloco em um movimento de descendente, provocando o avanço do corte do material.

De acordo com ZUAZO TORRES (1995), KASCHNER (1996), SPÍNOLA (1998) e CITRAN (2000), os teares multilâminas se subdividem em duas principais categorias, a depender do tipo de material a ser serrado:

- teares para mármore, com cinemática retilínea, lâminas diamantadas, operados com irrigação de água e
- teares para granito, com cinemática pendular ou semi-retilínea, que usam granalha metálica e são operados com lama abrasiva.

Os teares para granitos apresentam uma cinemática do quadro porta-lâminas de tipo oscilatória (pendular) ou mais raramente semi-retilínea. A serragem é realizada por meio da ação combinada de lâminas de aço e da lama abrasiva, esta constituída de água, cal e granalha metálica, distribuída por gotejamento intenso sobre o bloco (NITES, 1991; FACHADA, 1999). A mistura abrasiva é recolhida por um escoadouro posicionado sob o tear e reutilizada por meio de uma bomba que realiza um circuito fechado.

A seguir, são descritos os tipos de tear empregados na serragem de granitos, que são as rochas estudadas na presente pesquisa.

2.3.1) TEARES COM MOVIMENTO PENDULAR

Atualmente os teares de movimento pendular alternativo (FIGURA 2.1) são os mais empregados no beneficiamento primário de blocos de granito e rochas similares. Em geral, a velocidade média de serragem nestas rochas está em torno de 4 cm/h.

Embora sejam derivados dos antigos modelos de teares para o corte do mármore, os modelos atuais sofreram alterações para serem utilizados na serragem do granito. Todos os elementos mecânicos e estruturais foram redimensionados para suportarem os maiores esforços envolvidos no beneficiamento do granito (THOMPSON, 1990; CITRAN, 1994; STELLIN JÚNIOR, 1998; PEDROSA, 2003). Com isto, o peso desses equipamentos, que atingia 20 a 30 toneladas, no corte do mármore, hoje supera 80 toneladas, em alguns modelos.

FIGURA 2.1 – Tear moderno de grande porte. Empresa Marbrasa (Cachoeiro de Itapemirim/ES).

2.3.2) TEARES COM MOVIMENTO SEMI-RETILÍNEO

Este tipo de tear é usado exclusivamente no corte de granito e foi desenvolvido com o objetivo de aumentar a velocidade de corte desta rocha. A ligação entre o quadro porta-lâminas e os balancins é feita por meio de articulações excêntricas duplas, o que ao transformar parte do movimento pendular em horizontal confere um contato maior e mais longo entre as lâminas e o bloco durante o avanço e o recuo do quadro porta-lâminas, mas em contrapartida a renovação da polpa é pouco eficaz (AIM, 2002).

2.3.3) TEARES COM CORTE A SECO

Trata-se de um sistema de corte de blocos (a seco) na posição vertical que utiliza somente granalha e lâminas, dispensando o uso da mistura abrasiva (lama) como elemento de transporte dos resíduos, que são eliminados pela ação direta da gravidade combinada com uma força de arrasto exercida pelo quadro porta-lâminas (FIGURA 2.2).

Por se tratar de uma tecnologia única em nível mundial, este projeto recebeu em 2003 um aporte financeiro do Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT) e encontra-se em fase final de testes experimentais.

Em comparação com o tear convencional, PEDRAS DO BRASIL (2003) descreve algumas das principais vantagens observadas no tear com corte a seco: redução de gasto com água em quase 100%; com energia elétrica em 40% e com insumos em média 15%; diminuição do impacto ambiental; capacidade de corte mais rápido do bloco e melhor qualidade do produto final (chapas).

FIGURA 2.2 – Tear com corte a seco em exposição no estande da empresa Fundisa S.A. durante a XVII Feira Internacional do Mármore e Granito (FIMAG), Cachoeiro de Itapemirim/ES.

2.3.4) TALHA-BLOCOS

O processo de corte com o emprego de discos diamantados se dá pelo atrito entre os segmentos sinterizados com grãos de diamantes, fixados na borda de ataque do disco e o bloco da rocha, e é resultante da combinação de dois movimentos: o de rotação dos discos e o de translação do mandril (onde os discos são fixados) em sucessivas passagens, com pequenos e intermitentes movimentos de descida do mandril. (FIGURA 2.3).

FIGURA 2.3 – Talha-blocos para a produção de ladrilhos (Granitos Brasileiros S.A.)

Estes equipamentos são de uso mais recente e menos difundido do que os teares. São adequados para fins mais específicos (ladrilhos padronizados) e somente tiveram seu uso mais ampliado com o desenvolvimento de aplicação de diamante em ferramentas de corte e com a redução dos custos dos segmentos diamantados (SUAREZ DEL RIO *et al.*, 1998; AIM, 2002).

2.3.5) TEARES COM FIO DIAMANTADO

A tecnologia de serragem de blocos com fios diamantados é a mais recente das disponíveis atualmente e encontra-se em um estágio onde se podem esperar avanços importantes em termos de desempenho (ROC MAQUINA, 1998), tais como os teares que já estão utilizados por empresas capixabas (FIGURA 2.4).

FIGURA 2.4 - Tear multifios diamantados para corte de granito. Empresa Marmocil (Serra/ES).

2.4 - FUNCIONAMENTO DOS TEARES PENDULARES

Por se enquadrarem no âmbito central desta pesquisa, os teares com movimento pendular são tratados com maior detalhe, enfatizando as variáveis operacionais e os parâmetros que influenciam a qualidade da serragem, a saber: as lâminas, velocidade de descida do quadro porta lâminas, a granalha e o processo de abrasão, a mistura abrasiva e seu controle e, naturalmente, a rocha, que constitui o material a ser serrado.

2.4.1 – LAMINAS

São constituídas por aço laminado a quente, tipo barra chata, com composição especial - geralmente com elevado teor de carbono - para resistirem aos esforços que são submetidas.

Apresentam uma resistência média a tração de entre 5.000 a 6.000 MPa, para o corte de mármore e rochas similares, e de 7.000 a 9.000 MPa, para o corte dos granitos (PERFETTI, 1996).

a) **espessura da lâmina:** tem pouca influência sobre sua resistência à flexão, mas influencia muito na espessura do corte e na quantidade de material desperdiçado na serragem. Visto que a espessura do corte é cerca de 2 a 5mm superior à espessura da lâmina, um aumento de 1mm na sua espessura representa, num bloco de 1,5m largura, a perda de 3 a 4 chapas. Atualmente, as lâminas têm espessura de 4,2 a 5mm para teares de movimento pendular ou semi-retilíneos.

b) **altura da lâmina:** é função do tipo de tear e do material a ser serrado, hoje em dia utilizadas podem variar entre 90 e 130 mm.

c) **resistência e dureza:** na abordagem da solicitação mecânica das lâminas na serrada, SPÍNOLA (1998) considera que um tear ao realizar 90 golpes por minuto e que, em média, uma lâmina tem duração de duas serradas de 5 dias, sofrerá no decorrer de sua vida útil 2.592.000 esforços de flexão e posterior recuperação. Percebe-se que, no caso da serragem de granitos, as lâminas devem apresentar maior dureza, tenacidade e resistência à tração e à fadiga, de tal modo que o seu limite elástico não seja superado, evitando assim um desvio do corte.

d) **tipos de lâminas:** existem no mercado quatro tipos distintos de lâminas: lisas, acanaladas, com relevo e perfuradas, todos com a função de otimizar o rendimento da polpa abrasiva durante a serragem. Os três primeiros (FIGURA 2.5) são utilizados no corte de granitos em teares pendulares e semi-retilíneos, sendo as lisas as mais empregadas. O último tipo é mais usado em teares diamantados no corte de mármore.

FIGURA 2.5– Tipos de Lâminas: (A) lisas: o vinco facilita a operação manual de quebra do bico da lâmina; (B) com sulcos verticais: que mantêm o aprumamento da lâmina e ajudam o escoamento da lama e (C) com sulcos inclinados para o escoamento da lama (modificado de CETEMAG, 2003).

Ao estudarem o comportamento de diversos tipos de lâminas no decorrer de serradas de granito, BONGIORNI *et al.* (1993) mostraram que as lâminas com relevo são as que apresentam uma maior capacidade de arraste da lama e evitam a concentração de depósitos de granalha de grande diâmetro. Porém, as lâminas lisas são as mais usadas e difundidas, provavelmente em função de uma razão custo-benefício mais adequada.

e) **velocidade de descida**: o termo velocidade de descida (“cala”) do quadro porta-lâminas indica o avanço do corte nos teares. É normalmente expresso em cm/h e exerce influência na qualidade da serragem.

A escolha da velocidade de descida é um parâmetro importante e de difícil controle, em função do grande número de variáveis envolvidas no processo de serragem: dureza do material a ser serrado, tipo e número de lâminas utilizadas, tensão das mesmas e composição da lama abrasiva (STELLIN JÚNIOR, 1998).

De acordo com PEDROSA (2003), o início da serragem está relacionada ao “caseamento” das lâminas, ou seja, à formação da canaleta (sulco) na rocha. O caseamento é considerado concluído no momento em que dois terços da altura das mesmas estiverem dentro do granito.

2.4.2 - GRANALHA

A granalha constitui o elemento de corte do bloco nos teares convencionais, atuando como desagregador das partículas, enquanto que as lâminas têm função de condutor do abrasivo.

Este tipo de abrasivo tem sido empregado na serragem de granito há mais de 35 anos. O seu emprego iniciou-se com a granalha de fundição, hoje em dia, completamente substituída pela granalha de aço, a qual tem evoluído juntamente com a evolução dos teares, tendo-se adaptado às exigências da operação de corte (CITRAN, 2000).

As granalhas produzidas a partir de aço possuem granulometria definida e formato esférico ou angular, podendo ou não ser tratadas termicamente. No formato esférico (em forma de chumbinho), sua seção transversal é circular; enquanto que no angular (em forma de grão) a seção tem forma indefinida, já que resulta da moagem da granalha esférica.

Na serragem de granito, é utilizado principalmente granalha angular que é depois misturada com menor quantidade de granalha esférica.

Qualquer que seja o mecanismo utilizado na serragem, a cominuição do granito vai depender do número de grãos ativos de abrasivo presentes na polpa (grãos que, pela dimensão, são capazes de efetuar uma ação eficaz de abrasão e de choque) e que acionados pelo movimento das lâminas atuam sobre o bloco.

Sob a óptica da tribologia, abordada pioneiramente por SILVEIRA (no prelo), a etapa de serragem nos teares pendulares pode ser entendida como sendo um processo de desgaste entre

três corpos (FINNIE, 1960; ROSSI et al., 1997), no qual o abrasivo (granalha) “desliza” entre duas superfícies (lâmina e granito), conforme mostrado na FIGURA 2.6.

FIGURA 2.6 – Esquema de desgaste a três corpos (ZUM-GAHR, 1987).

Entre os fabricantes não há um consenso quanto ao tipo de granalha que deve ser usado na serragem de diferentes tipos de granitos, o que reflete no empirismo vigente nas serrarias. Estudos mais aprofundados que relacionem a dureza (QUITETE & RODRIGUES, 1998), o tamanho e a forma do abrasivo (ZUM-GAHR; 1987; FERRARINI, 1998), a tensão envolvida no processo de desgaste (STACHOWIAK & BATCHELOR, 1993), bem como a integração destes aspectos em um contexto tribológico (COIMBRA FILHO *et al.*, 2004; RIBEIRO *et al.*; 2004b, 2005b; SILVEIRA *et al.*, 2005), certamente subsidiarão importantes inovações tecnológicas para este importante setor produtivo.

Para as características mecânicas das granalhas não existem especificações internacionais em relação à sua dureza e tenacidade.

Segundo ZUAZO TORRES (1995) e PEDROSA (2003), a granalha de ferro fundido apresentava dureza entre 57 e 62 Hrc. Sua baixa durabilidade foi decorrente do comportamento frágil (quebrava mais do que amassava).

A possibilidade de tratamento térmico do aço permitiu a obtenção de granalhas metálicas com maior resistência ao esmagamento (mais tenazes), com dureza entre 64 a 67 HRc. A granulometria varia entre 0,4 a 1,2mm. A maior dureza e durabilidade das granalhas de aço possibilitaram o aumento da velocidade de cala na serragem de granitos.

a) Formas de atuação da granalha

Como visto anteriormente, o movimento pendular de pequena amplitude típico dos teares convencionais faz com que as lâminas instantaneamente toquem e se afastem do sulco do corte.

Avaliando estes dados, NITES (1989, 1991) identificaram três formas prováveis de atuação dos grãos de granalha contra o fundo da canaleta no processo de serragem: riscamento, impacto, e rolamento. Segundo CITRAN(1988) e CITRAN & PORTOLANO (1988), nas laterais da canaleta não há um processo de corte significativo, mas sim a fragmentação das granalhas mais grossas à medida que desce pelas laterais da lâmina até atingir sua base.

No riscamento, por estarem em uma escala de dureza decrescente na ordem abrasivo/lâmina / rocha, eventualmente o grão de granalha poderia ficar preso ou incrustado na lâmina em movimento (funcionando como um dente-de-serra), efetuando o risco na rocha e desagregando grãos ao longo do processo.

No impacto, cada grão de granalha recebe o golpe da lâmina e o transmite para a rocha, estilhaçando os grãos vizinhos àquele local, efetuando pequenas desagregações.

No rolamento, os grãos de granalha originalmente esféricos ou então angulares desbastados, ao se deslocarem no sulcos, efetuam pequenas desagregações na rocha.

A análise destas hipóteses revela que o corte da rocha é realizado pela combinação de todas elas ao mesmo tempo. De qualquer modo, é fundamental o monitoramento da composição da lama abrasiva: o excesso de pó de pedra impede a atuação da granalha, não ocorrendo impacto e rolamento.

2.4.3 - POLPA OU LAMA ABRASIVA

As principais funções da lama abrasiva no tear são: servir de veículo ao abrasivo (mantendo em suspensão a granalha nela contida, conduzindo-a da bomba do poço até a região de corte), lubrificar e resfriar as lâminas e retirar o pó de pedra gerado nas canaletas entre as chapas.

A polpa abrasiva representa, sem dúvida, o elemento mais importante e complexo do sistema (PENHA *et al.*, 1996; PEDROSA, 2003). Cientes disto, muitos profissionais e entidades ligadas ao setor de rochas ornamentais têm desenvolvido seus trabalhos, há tempos, na busca de um controle mais efetivo da lama abrasiva no decorrer da serragem de granitos.

a) Composição: a lama abrasiva é composta de quatro elementos: água, cal, pó de pedra e granalha, cuja proporção varia dentro de amplos limites em função da experiência e peculiaridades dos serradores. Maiores informações podem ser encontrados em PERFETTI *et al.* (1990), ZUAZO TORRES (1995), FERREIRA (1996) e PEDROSA (2003).

b) Características físico-químicas: De acordo com CLERICI & FRISA MORANDINI (1987); FRISA MORANDINI & GILLI (1987); PERFETTI *et al.* (1991, 1993a, 1993b); BERRY & FABRI (1992); MANCA (1992); BONGIORNI *et al.* (1993); CITRAN (2000) e

CETEMAG (2003), as principais características da lama abrasiva que devem ser monitoradas com o objetivo de um melhor desempenho da serragem são:

b.1) VISCOSIDADE: é muito importante no controle da lama. A viscosidade é a propriedade de um fluido que determina o grau de resistência à força cisalhante. A viscosidade é devida, principalmente, à interação entre as partículas do fluido. Deste modo, quanto mais coesas as partículas estiverem uma às outras, mais viscoso será o fluido. As unidades de medidas da viscosidade são: Pa.s (Pascal X seg.) no Sistema Internacional ou Centipoise (Poise/100) no Sistema Absoluto CGS (1 Pa.s corresponde a 100 Centipoise).

b.2) GRANALHA ATIVA E TOTAL: A quantidade de granalha distribuída pelos bicos do chuveiro do tear sobre o bloco é outro fator fundamental no processo de serragem. Isto não quer dizer que, quanto maior a quantidade de granalha, maior a velocidade de cala, pois existe um ponto, a partir do qual, o acréscimo de granalha impede esse aumento, podendo culminar no “embuchamento” do tear.

Dependendo da granulometria, a granalha presente na polpa é classificada como *ativa*, que é a granalha que possui um bom poder de corte, com diâmetro acima de 0,425mm; e *total*, que é toda a granalha encontrada na polpa abrasiva.

b.3) PESO ESPECÍFICO E TEOR DE CAL: como referência, o peso específico, o teor de cal e as concentrações mais freqüentes dos demais parâmetros de polpas abrasivas utilizadas na serragem de granitos são apresentadas na TABELA 2.1.

TABELA 2.1 - Composição, peso específico e viscosidade das polpas abrasivas, modificados de PERFETTI *et al.* (1993) e de STELLIN JÚNIOR (1998).

Parâmetro	Concentração
Peso específico (g/L)	1,45 a 1,70
Viscosidade (Centipoise)	900 a 1400
Cal (g/L)	10 a 50
Detritos (g/L)	400 a 700
Água (g/L)	500 a 700

Outros parâmetros que devem ser levados em conta são: a velocidade de descida do quadro porta-lâminas, as dimensões dos blocos, a alimentação diária de granalha e cal, a freqüência das lavagens e o consumo energético do quadro e da bomba.

c) Freqüência e duração das descargas

Outra operação de importante controle é a lavagem periódica das polpas abrasivas. A operação de lavagem (ou de descarga) é fundamental para eliminar do sistema os detritos do

corte, além de regular a viscosidade e o peso específico da mistura (PERFETTI, 1992; FACHADA, 1999; PEDROSA, 2003).

Para cada fração da polpa retirada, que é regulada por uma sonda de nível no poço, é adicionada uma quantidade igual de água. Deste modo, é possível diluir a mistura que, caso contrário, se tornaria mais e mais viscosa com o aporte contínuo de materiais sólidos.

A duração da operação deve ser proporcional à velocidade de corte, de modo que os resíduos do corte sejam eliminados com a velocidade com que se produzem.

O aumento da produtividade das serradas (hoje as exportações brasileiras de chapas já ultrapassam a de blocos) tem sido obtido a partir tanto do aprimoramento dos equipamentos como das técnicas empregadas na operação. Em 1988, um tear de 2,5m serrava em torno de 1000m²/mês. Em função dos avanços citados, um tear do mesmo tamanho produz 4000m² de chapas/mês, um incremento de quase 400% (ATAÍDE, 2003; CHIODI FILHO, 2004b).

Por um lado, a abertura do mercado ocorrida no final da década de 80 promoveu a chegada de teares importados no Brasil. Estes equipamentos (com tecnologia mais avançada) fizeram com que os fabricantes nacionais também aprimorassem seus produtos. Entre as melhorias, aponta-se a robustez dos novos teares, os tensores hidráulicos e, principalmente, os equipamentos para monitoramento da lama abrasiva que contribuíram decisivamente para este incremento produtivo.

Nas micros e pequenas serrarias (com até quatro teares de pequeno porte e 15 a 20 anos de uso) foram incorporados métodos simples e de baixo custo para o controle da lama abrasiva (viscosidade, peso específico e quantidade de gralha), realizados simultaneamente para que a alimentação dos teares seja feita de forma constante (CETEMAG, 1995; PENHA *et al.*, 1996; FERREIRA, 1996).

2.5 - A MATÉRIA-PRIMA: ROCHA

2.5.1 - GRANITOS

No estudo das rochas ornamentais e de revestimentos o termo granito, genericamente, engloba a família das rochas silicáticas, incluindo todos os tipos ígneos: ácidos, intermediários, básicos, nos jazimentos plutônicos e até vulcânicos. Ainda a eles associados, têm-se alguns tipos de rochas sedimentares e metamórficas, litologicamente representadas por arenitos, conglomerados, quartzitos, migmatitos e gnaisses de cores variadas. Para um petrólogo, esta definição de granito é assustadora, mas no dia-a-dia da Indústria da Pedra é corriqueira.

Os minerais constituintes dos granitos são essencialmente feldspatos, quartzo, micas (biotita e muscovita), em menor porcentagem e nem sempre presentes ocorrem anfibólios (comumente a hornblenda) e piroxênios (aegirina, augita e hiperstênio). Podem ocorrer como

acessórios, pequenos cristais de ilmenita, zircão, magnetita, apatita, granada, topázio, cordierita e fluorita.

A resistência ao desgaste abrasivo das rochas é proporcional à dureza (escala de Mohs) de seus minerais, assim nos granitos a resistência será maior quanto maior a quantidade de quartzo presente. O desgaste das rochas pode ser também provocado por escarificação (arranque) dos grãos minerais, o que parece estar condicionado não à composição mas à textura dos cristais.

2.5.2 - CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DAS ROCHAS ORNAMENTAIS

É feita por meio de ensaios que determinam as propriedades físicas e mecânicas e objetivam balizar os campos de aplicação dos materiais conforme padrões normatizados. Os ensaios constam como itens obrigatórios em catálogos promocionais e são exigidos pelos grandes compradores. No entanto, essas propriedades de maior importância na construção civil, não são necessariamente as mais importantes para o estudo do processo de serragem ou de desbaste de rochas ornamentais. Como referência, SPÍNOLA (1998) utilizou alguns dos ensaios como: análise petrográfica; índices físicos e resistência à compressão uniaxial com o objetivo de verificar a influência da qualidade da serragem de granitos no consumo energético do desbaste.

Alguns autores têm correlacionado características tecnológicas com as propriedades petrográficas das rochas. No estudo geológico, petrográfico e tecnológico das rochas ornamentais da “Jazida Formoso”(MG), MOURA (1998) apresenta algumas considerações em respeito à qualificação destes materiais:

- A natureza composicional dominante na pedreira, associada à textura fina a média e ao excelente entrelaçamento dos grãos minerais, refletem a alta dureza e resistência mecânica indicados pelos ensaios realizados;
- A fraca e incipiente alteração mineral e o baixo grau de microfissuramento corroboram os baixos índices de porosidade e absorção d'água determinados nos ensaios;
- A insignificante presença de minerais deletérios, restrita a alguns óxidos, favorece a utilização dos referidos materiais em ambiente físico-químicos agressivos (como é caso do processo de serragem nos teares).

As intercalações mais espessas (centimétricas a decimétricas) de leitos de metadioritos (“mulas”) aos microleitos biotíticos (“fios de cabelo”) constituem os principais aspectos negativos levantados por MOURA (*op.cit.*). Exigem um cuidadoso planejamento da lavra, pois além de diminuir a recuperação de blocos nas frentes de lavra, também podem ocasionar rupturas de blocos durante a extração e mesmo quebras e deslocamentos de chapas das rochas durante a serragem.

ARTUR *et al.* (2001), estudando rochas associadas ao batólito Socorro (SP/MG), concluíram que a análise petrográfica quantitativa é um bom elemento para a estimativa do comportamento tecnológico das rochas ornamentais. Propuseram ainda a determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas com um método não destrutivo para a obtenção, através de correlação, de valores de resistência à compressão, módulo de ruptura, flexão na tração e coeficiente de dilatação térmica linear.

VIDAL (2001) estudando o elemento abrasivo do fio diamantado na lavra de alguns granitos do Estado do Ceará verificou que a velocidade de corte e o consumo dos anéis de pérolas diamantadas são sobremaneira influenciados pela quantidade e quartzo presente na rocha. Tais valores podem apresentar boa correlação com o fator serrabilidade de blocos.

TORQUATO *et al.* (2002) também utilizaram os valores de velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas para determinar, indiretamente, o grau de alteração e coesão das rochas. Estes autores porém, encontraram grande variação nos valores de velocidade da onda ultra-sônica em granitos dados como isotrópicos. A partir dos valores de velocidade máximos e mínimos encontrados em cada granito, foi determinado o índice de anisotropia da rocha, o qual foi verificado que as mesmas apresentavam características anisotrópicas. Diante desta constatação os autores propuseram que, para os materiais estudados, fossem utilizados os valores máximos e mínimos dos resultados de caracterização tecnológica e não os valores médios.

NAVARRO & ARTUR (2002) definiram parâmetros petrográficos como subsídio para inferência das características tecnológicas de granitos ornamentais (*stricto sensu*) a partir de análise estatística multivariada. Como produto final foram definidas quais características petrográficas que mais condicionam os resultados dos ensaios de caracterização tecnológica.

Dois ensaios que merecem menção são a dureza Knoop e o ensaio de abrasão profunda, pois em algumas vezes são correlacionados a serrabilidade de granitos no desdobramento de blocos em teares.

A dureza Knoop é definida como a carga aplicada em uma ponta de diamante de formato padronizado, normal à superfície da amostra, dividida pela área projetada de uma cavidade microscópica produzida no corpo de prova. A impressão tem a forma de um losango alongado, idealmente com razão largura/comprimento igual a 1,71 (FIGURA 2.7). Como essa relação é conhecida, mede-se apenas a diagonal maior.

FIGURA 2.7 – Visualização de impressão produzida por carga de 200gf em amostra de cobre. O comprimento da diagonal maior é de 170µm. Aumento 10X. (Foto do autor).

A dureza Knoop é então calculada por meio da seguinte equação:

$$HK = \frac{1.450,6 \times 1000 \times F}{I^2} \times 9,807 \quad (1)$$

onde: HK- dureza Knoop em MPa; F – carga aplicada em N (1,961N = 200gf) e I = comprimento da diagonal maior da impressão, em µm.

Há muitos anos, esta técnica vem sendo aplicado em rochas ornamentais e de revestimento na Espanha e Itália, países de forte tradição no setor. O uso rotineiro deste ensaio em rochas foi sugerido por MANCINI & FRISA MORANDINI (1982), os quais sugerem que sejam realizadas impressões em vinte pontos alinhados e igualmente espaçados de 1mm, com carga de 1,96N (200gf). Desde então, a maioria dos trabalhos sobre a utilização de dureza knoop em rochas tem sido realizada por pesquisadores vinculados à mesma instituição destes autores (CLERICI & FRISA MORANDINI, 1985; FRISA MORANDINI *et al.*, 1986; CARDU *et al.* 1994, 1995, 1996, 1997 e 1998).

Estes autores propuseram a confecção de um “diagrama de distribuição acumulada de dureza”, que exprime os valores em ordem crescente. Desta distribuição registram-se os valores relativos aos primeiros 25%, 50% e 75% da curva, designados “frequências cumulativas”: HK₂₅, HK₅₀ e HK₇₅. Sugerem também a determinação de um “coeficiente de heterogeneidade”, definido pela razão HK₇₅/HK₂₅. Não adotam o desvio padrão, pois o diagrama de dureza não segue uma distribuição normal, já que depende da combinação das fases minerais independentes entre si em relação à dureza.

Segundo MANCINI & FRISA MORANDINI (1982), os valores de HK₂₅, HK₅₀ e HK₇₅ refletiriam inúmeras situações em que a dureza da rocha está envolvida:

- O valor HK_{75} indicaria a influência dos minerais mais duros da rocha, que afeta a abrasividade da rocha, ou seja, importante na avaliação do desgaste de ferramentas de corte.
- O valor HK_{25} seria um bom indicador de desgaste por abrasão, onde os minerais de dureza baixa são efetivamente desgastados, enquanto que os minerais mais duros são removidos por escarificação, independentemente de sua dureza.
- O valor HK_{50} seria um valor muito próximo da dureza média da rocha ($HK_{média}$).

No Brasil, a utilização da dureza Knoop em rochas para revestimento iniciou-se em 1996, não havendo até o presente, normas nacionais para padronizar sua realização. Neste sentido, o trabalho de QUITETE (2002) mostra-se muito importante por verificar sua adequabilidade às rochas de revestimento brasileiras.

Após a realização de testes comparativos (baseados no uso do tribômetro *Amsler*, do disco *Bohme* e da máquina *Capon*) para mediação da resistência ao desgaste abrasivo de seis tipos de rochas, COMAZZI *et al.* (1995) demonstraram que a máquina *Capon* foi a mais apropriada para esta finalidade. Desde então, o teste tem sido adotado experimentalmente para medidas de abrasão em mármore e granitos pelo Comitê Europeu de Normatização (CEN/TC 246, Pedra Natural).

O método *Capon*, também chamado de *abrasão profunda*, foi desenvolvido originalmente para ladrilhos cerâmicos. No caso brasileiro, este ensaio é regido pelo Anexo E da norma ABNT NBR 13818 (1997a). Este ensaio relaciona a resistência da rocha por meio da medição do comprimento de uma ranhura (corda de circunferência) resultante da rotação de um disco de aço, numa superfície plana do corpo de prova.

2.5.3 – PROPRIEDADES DAS ROCHAS E O PROCESSO DE DESDOBRAMENTO

A interação entre a composição, texturas e estruturas é o fator que define a resistência aos agentes químicos, físicos e mecânicos de toda rocha, ou seja, é o resultado das suas características petrofísicas (SELONEN, 2000).

Neste aspecto, a petrografia microscópica constitui um método de investigação eficaz e de baixo custo que possibilita a visualização detalhada dos constituintes da rocha. A análise integrada de características como a composição mineralógica, textura, grau e tipo de alteração e estado microfissural permite explicar o comportamento físico e mecânico dos materiais, diagnosticado por meio de ensaios tecnológicos ou observado no decorrer das etapas de serragem e de polimento.

Com base no conhecimento das características dos minerais presentes e das condições físico-químicas que levam à sua alteração e ao enfraquecimento e desagregação das rochas, RODRIGUES *et al.* (1996) têm desenvolvido trabalhos que incrementam o uso da petrografia

microscópica na orientação dos trabalhos de beneficiamento de rochas ornamentais. Alguns exemplos são citados a seguir:

- Sulfetos (pirita, calcopirita, etc.) presentes em alguns mármore e granitos, alteram-se facilmente quando expostos ao ar e líquidos ácidos ou alcalinos, formando buracos ou manchas. Granitos contendo granada, mineral com propriedades físicas que os tornam quebradiços diante de solicitações de abrasão e em ambiente úmidos, apresentam freqüentes defeitos nas chapas obtidas na serragem, normalmente encarecendo o processo de polimento.

- Os estados de alteração e microfissural observáveis ao microscópio petrográfico, são particularmente importantes para se prever o comportamento da rocha em solicitações de atrito e de compressão e também na presença de líquidos. Por exemplo, granitos ricos em plágioclásio alterado hidrotermalmente podem ter sua resistência físico-mecânica reduzida se sofrerem abrasão ou contato com água.

- A textura da rocha geral é outro parâmetro importantíssimo para a serrabilidade de granitos ornamentais. Assim, diferenças no grau de entrelaçamento ou imbricamento entre os cristais podem ser responsáveis por diferenças na resistência à abrasão e ao impacto. Rochas porfiróides ou inequigranulares tendem a ser menos resistentes do que as equigranulares mais finas.

CITRAN (2000) relatou a existência, no final da década de 60, de teares de movimento retilíneo, nos quais as lâminas movimentavam-se paralelamente à superfície a serrar e, portanto, sem componentes que pudessem executar uma ação dinâmica contra o granito: a ação era, portanto, essencialmente uma abrasão por parte de um material menos duro (a granalha de aço, dureza máxima de 850 Vickers) sobre um mais duro (o quartzo, cerca de 30% em volume do granito, com 1150 Vickers).

Era um fato no mínimo estranho e foi talvez o que motivou este pesquisador a aprofundar seus estudos a respeito das considerações mecânica e energética sobre a serragem dos granitos (CITRAN, 1988). Neste trabalho, ele realizou os seguintes experimentos:

1. Fazia correr sobre uma placa polida de granito alguns grãos de granalha angulosa de 1mm, de dureza 840 Vickers, comprimidos por uma lâmina de aço com carga de 20kg. As impressões (cerca de 30mm de comprimento) eram claramente visíveis nos grãos de mica, de feldspato e de quartzo. Durante o percurso, observou alguns “rasgos” na passagem de um mineral para outro.
2. Para evitar incertezas, os três materiais foram examinados no durímetro Vickers (com carga de 1000g), conseguindo-se as seguintes impressões: quartzo (40 μ m, dureza 1150 Vickers), ortoclásio (60 μ m, dureza 750 Vickers), granalha angulosa (46 μ m, dureza 840 Vickers) e granalha esférica (68 μ m, dureza 550 Vickers).
3. O teste foi repetido com as granalhas menos duras. Ele notou com surpresa que, enquanto o ortoclásio não revelava nenhum arranhão, o percurso sobre o quartzo era

visível e marcado por duas linhas paralelas brancas, que ao microscópio mostraram faixas de quartzo finamente marcado.

Não foram percebidos “rasgos” entre um cristal e outro. Isso significava que o quartzo era mais “frágil” que o ortoclásio (mas mais duro). Para CITRAN (1998), “fragilidade” significava escassa resistência aos choques, mas nos testes não aconteceram choques: existia então uma “fragilidade estática” do quartzo.

Este autor abordou o problema do seguinte modo: o módulo elástico do aço é cerca de 210.000N/mm²; o do quartzo 70.000N/mm². Quando a granalha de aço rola sobre o quartzo com carga relevante, esta se esmaga levemente (menos) e o quartzo se deforma levemente (mais) afundando, no centro das marcas por compressão, mas nas bordas do “caminho” por tração. Depois da passagem da granalha, ela retorna à forma esférica porque não tinha superado o limite elástico, mas o quartzo, terminada a tração nas duas bordas que se alongaram, fica visivelmente marcado: existem microfissuras ou defeitos nos cristais de quartzo que se comportam como centros de menor resistência dando assim lugar a quebras prematuras.

No ano seguinte, um estudo realizado por BERRY *et al.* (1989), seguido de testes de indentação em grãos de quartzo, de feldspato e de biotita, chegou a conclusões análogas (FIGURA 2.8).

FIGURA 2.8 – Comportamento mecânico do quartzo em prova de incisão (BERRY *et al.*, 1989).

Nesta figura fica evidenciado o comportamento mecânico distinto do quartzo, que no trecho (1-2) apresenta microfaturas pouco perceptíveis, enquanto que no trecho (4-5) ocorre um

intenso microfraturamento. No feldspato (trecho 2-3) o traço é menos evidente que no quartzo (trecho 1-2). Pequenas crateras de contato estão presentes nos pontos 2 e 4. Segundo BERRY *et al.* (1989), a variada intensidade de microfraturamento originária do quartzo é o que determina a geometria e a característica da incisão.

Na prática, isto explica porque o quartzo se desagrega mais facilmente (mesmo tendo dureza maior) que o feldspato no processo de serragem nos teares.

De acordo com TUGRUL & ZARIF (1999), muitos investigadores têm estudado o efeito do tamanho do grão nas propriedades mecânicas das rochas. Salientam, todavia, que as relações entre a composição mineral e estas propriedades são baseadas essencialmente no conteúdo de quartzo.

ONODERA & ASOKA KUMARA (1980) correlacionaram as propriedades texturais e as propriedades mecânicas de rochas graníticas do norte da Tailândia. Considerando quatro tipos de rocha com propriedades texturais e genéticas iguais, com exceção do tamanho do grão (fino, pequeno, médio e grosseiro), mostraram que a resistência à compressão, a resistência à tração e a velocidades das ondas P e S aumentam linearmente à medida que o tamanho de grão diminui.

MERRIAM *et al.* (1970) estudaram amostras de rochas graníticas do batólito de Serra Nevada (EUA), utilizadas para fins ornamentais e de revestimento. Os autores determinaram que a resistência à tração é inversamente proporcional à porcentagem de quartzo, devido às diferenças texturais observadas em rochas com diferentes porcentagens de quartzo. As rochas ricas em quartzo são compostas de grãos equidimensionais mostrando pouco intercrescimento de quartzo, enquanto que as rochas com menor conteúdo de quartzo consistem de intercrescimento e/ou imbricamento de “ripas” e prismas.

O entendimento do comportamento mecânico das rochas em relação a sua microestrutura tem sido tratado em inúmeros trabalhos. WILLARD & McWILLIAMS (1969) reportaram que as microfraturas, os contatos entre os grãos, a clivagem mineral e os planos de macla influenciam a resistência da rocha. Tais discontinuidades atuam como superfície de fraquezas e controlariam a direção em que as rupturas ocorreriam. Para TUGRUL & ZARIF (1999), o tamanho, a forma e o grau de imbricamento dos minerais são outros fatores que também afetam significativamente as propriedades mecânicas das rochas.

TUGRUL & ZARIF (*op.cit.*) realizaram uma investigação abrangente das relações entre propriedades petrográficas e mecânicas de amostras de rochas graníticas de diferentes partes da Turquia e concluíram que:

- A composição mineral é uma das principais propriedades que controla a resistência da rocha e que a variação nas porcentagens de quartzo e de feldspatos é o fator mais importante que afeta as propriedades mecânicas;
- O tamanho médio dos minerais exerce influência na resistência da rocha (a resistência aumenta à medida que o tamanho médio dos grãos diminui);

- As relações entre as propriedades mecânicas e as características petrográficas são mais significativas se comparadas àquelas entre os parâmetros físicos e petrográficos. A resistência à compressão aumenta à medida que a massa específica aparente seca e a velocidade das ondas P aumentam. Como esperado, há uma relação inversa entre a resistência à compressão uniaxial e porosidade total e efetiva.

MANCINI & FRISA MORANDINI (1982) analisaram a relação entre a dureza Knoop e o desgaste abrasivo em amostras de vinte rochas ornamentais italianas de diversas durezas (TABELA 2.2) obtiveram um coeficiente de 0,66 entre HK₂₅ e o desgaste abrasivo em mm, utilizando como abrasivo uma mistura de carbeto de silício e óleo mineral. Para HK₅₀ e HK₇₅ os coeficientes obtidos foram, respectivamente, de 0,59 e 0,57, valores estes que confirmariam a menor contribuição dos minerais no desgaste abrasivo.

TABELA 2.2 – Dados de desgaste abrasivo e dureza Knoop apresentados por MANCINI & FRISA MORANDINI (1982).

Tipo petrográfico	Desgaste abrasivo (valores relativos)	HK₂₅ (kgf/mm²)	HK₅₀ (kgf/mm²)	HK₇₅ (kgf/mm²)	HK₀₋₅₀* (kgf/mm²)
1 Gabro	1,90	600	750	800	610
2 Peridotito	2,00	490	820	1.010	637
3 Sienito	2,00	4606	520	650	458
4 Granito branco	2,15	490	615	695	441
5 Sienito	2,15	380	400	500	406
6 Kinzigito	2,25	580	790	1.140	478
7 Gnaiss	2,45	400	535	675	400
8 Quartzito xistoso	2,50	695	765	875	520
9 Gabro	2,60	490	650	700	315
10 Sienito	2,60	445	560	615	320
11 Diorito	2,80	325	635	590	320
12 Calcário microcristalino	2,80	190	200	580	185
13 Calcário microcristalino	3,10	110	130	140	128
14 Calcário microcristalino	3,25	160	175	185	158
15 Calcário microcristalino	3,25	145	150	160	140
16 Calcário microcristalino	3,50	330	360	390	312
17 Calcário microcristalino	3,50	155	170	180	150
18 Ignimbrito	4,60	195	235	350	170
19 Serpentinito	4,95	110	160	175	100
20 Mármore sacaróide	5,60	110	130	135	100

HK₀₋₅₀*: média simples da metade menor dos valores de dureza determinados

Estes autores consideram que uma das causas dos baixos coeficientes de correlação é a tendência dos valores de desgaste serem subestimados para rochas microcristalinas de baixa dureza. Para eles, isto seria uma deficiência inerente ao método empregado para determinação do desgaste. Neste sentido, CITRAN (2000) reporta a vantagem que o teste de abrasão profunda apresenta em relação aos tribômetros clássicos: a ausência de resíduos de abrasivos (e óleo mineral) que sujavam o disco horizontal em rotação, falseando os resultados do ensaio.

É conhecido que os blocos de granitos comerciais podem ser cortados em chapas com maior ou menor dificuldade, a uma maior ou menor velocidade, com mais ou menos consumo de materiais e de energia. Portanto, o corte é inversamente proporcional ao consumo, tempo e dificuldade encontrados durante a operação.

No caso de corte com a utilização de ferramentas diamantadas, particularmente serras e discos, o processo é bem mais estudado e entendido, graças aos maiores recursos econômicos e de investigação que têm os produtores de diamante e a enorme diferença de dureza entre os diamantes e as rochas.

BURGESS (1989), NEVES (1993), LUO (1997) e SUAREZ DEL RÌO *et al.* (1998) mostraram que a economicidade na etapa de corte de rochas ornamentais e a melhoria na qualidade das superfícies cortadas são condicionadas por uma série de parâmetros próprios do sistema de corte:

- A versatilidade da máquina de corte, particularmente a possibilidade de variação da potência, da velocidade periférica e de deslocamento do disco são condicionadas por uma série de parâmetros próprios do sistema.
- A utilização de disco diamantado adequado (tipo, tamanho e concentração de diamante e a dureza da matriz que engloba os diamantes). Nos teares diamantados, é conveniente o uso de cristais de diamante com formas irregulares, que possuam uma maior aderência com a matriz.
- O estabelecimento de condições adequadas de corte: os granitos duros são cortados a regimes da ordem de 100 cm²/min e os granitos mais brandos a regimes maiores (1000cm²/min). Todavia, SUAREZ DEL RÌO *et al.* (1998) comenta que para cada tipo de disco diamantado e de granito existe uma velocidade de corte mais econômica a ser determinada para a obtenção de um melhor rendimento do processo de corte.

A influência das características intrínsecas das rochas ornamentais no processo de corte com discos diamantados tem sido estudada por vários pesquisadores (WRIGTH & CASSAPI, 1985; BRAUNINGER & McGOWAN, 1991; RODRÍGUEZ-REY *et al.*, 1998). Em microescala, o corte se realiza em uma matriz livre de descontinuidades e é onde as características petrográficas da rocha (mineralogia, textura e estrutura) exercem sua influência e se podem investigar os mecanismos fundamentais de corte. Estes autores descrevem algumas

das características petrográficas da rocha que estariam vinculadas a serrabilidade de diferentes materiais rochosos:

- O grau de alteração dos minerais influi na capacidade de arranque de material por parte dos grãos de diamante e a proporção de quartzo não deve ser usada como um parâmetro isolado na indicação da serrabilidade;
- A textura da rocha (forma, tamanho e disposição dos minerais): por exemplo, quanto maior o tamanho do grão, maior será a abrasividade;
- A presença de microfissuras, muitas vezes orientadas, em granitos confere uma certa anisotropia a estas rochas e podem, conseqüentemente, influenciar a sua serrabilidade.

NEGRI (1997) correlacionou a microdureza Vickers equivalente (calculada) e resistência à compressão (RCU) com a serrabilidade de oito granitos ornamentais, com disco diamantado, medida em mm²/s (TABELA 2.3). As determinações das durezas nas amostras apresentaram um erro relativo máximo de 7,3%, atribuídos à heterogeneidade das rochas estudadas. Ao relacionar resistência à compressão uniaxial e dureza, o autor obteve um índice de correlação (igual a 0,91 entre um índice de serrabilidade (IS, equação 3) e a serrabilidade (V, equação 4), conforme apresentado a seguir:

$$IS = 0,0535MDVeq + 0,9465RCU \quad (3)$$

$$V = \frac{8,149 - 0,08958xIS}{0,1890 - 0,001980xIS} \quad (4)$$

onde MDVeq é a dureza Vickers equivalente e RCU é a resistência à compressão uniaxial, ambas expressas em kg/mm². A MDVeq foi calculada a partir dos teores de quartzo, feldspato e biotita das rochas, com suas durezas determinadas previamente por mais de 1.000 identificações nos três minerais nas amostras das rochas estudadas. Essas durezas foram determinadas com cargas de 300gf para o quartzo, 100gf para o feldspato e 50gf para a biotita.

TABELA 2.3 - Dureza Vickers Equivalente e serrabilidade de granitos com discos diamantados (modificado de NEGRI, 1996).

Rochas	MDVeq (kgf/mm ²)	RCU (kgf/mm ²)	IS (kgf/mm ²)	V (mm ² /s)
Ju Bonsucesso	1.208	122	76,4	35,5
Cinza Mauá	1.201	155	79,2	37,3
Verde Esmeralda	834	202	64,1	37,6
Capão Bonito	1.263	136	80,7	27,4
Cinza Andorinha	672	171	52,5	40,4
Jacarandá	1.213	175	81,8	30,8
Franciscato Bonsucesso - A	1.273	101	77,9	37,2
Franciscato Bonsucesso - B	1.305	208	89,9	13,5

LEGENDA: MDVeq: dureza Vickers equivalente, RCU: resistência à compressão, IS: Índice de Serrabilidade e V: Serrabilidade

Em relação à serragem de granitos em teares com granalha e lama abrasiva, o entendimento mais aprofundado deste processo ainda não foi alcançado. Para CITRAN (2002), isto é devido a três aspectos fundamentais: (i) o fato – crucial – de que o “material de corte” apresenta uma dureza similar ao material a ser cortado, (ii) o grande número de parâmetros que devem ser levados em consideração, (iii) a falta de uma teoria de corte devidamente reconhecida.

Nesta questão, um fato chama a atenção: são quase que inexistentes os trabalhos que vinculam as propriedades intrínsecas dos granitos ornamentais, sua serrabilidade e o processo de serragem propriamente dito. Alguns estudos citados a seguir exemplificam esta lacuna do conhecimento técnico-científico.

Ao estudarem amostras de dezesseis granitos ornamentais, FORNASERO *et al.* (1988) não obtiveram boas correlações entre dureza Knoop e serrabilidade destas rochas em teares que utilizam granalha de aço (TABELA 2.4).

TABELA 2.4 – Relação da serrabilidade em teares com dureza Knoop (modificado de FORNASERO *et al.*, 1988)

Nome comercial	Consumo de granalha (kg/m ²)	Velocidade de corte (cm/h)	Classificação petrográfica	Granulação	Dureza Knoop (Gpa)			
					HK ₂₅	HK ₇₅	HK _{media}	$\frac{HK_{75}}{HK_{25}}$
Nero Tijuca	1,8	3,7	Biotita-piroxênio diorito	F	3,5	7,0	5,5	2,00
Rosa Sardo	2,2	2,6	Biotita granito	MG	5,5	8,9	7,2	1,61
Bianco Sardo	2,3	2,3	Biotita granito	MG	5,5	8,3	6,9	1,50
Rosso Balmoral	2,5	2,1	Biotita granito	MG	5,9	9,2	7,4	1,57
San Luis	2,5	2,1	Nefelina sienito	G unif	3,0	5,2	4,2	1,77
Nero África	2,6	1,9	Augita-enstatita diorito	M unif	4,6	7,0	5,5	1,53
Baltic Brown	2,7	1,9	Biotita-turmalina granito	G	6,0	11,2	8,3	1,85
Rosso Santiago	2,7	1,9	Biotita granito com granada	G	6,8	10,7	8,8	1,27
Multicolor	2,9	1,9	Biotita granito cataclástico	MF	4,6	9,2	7,0	2,01
Rosso Goa	2,9	1,9	Biotita leuco-granito porfirítico	G-GG	4,3	7,3	5,9	1,71
Labrador	2,9	1,6	Augita-biotita sienito com olivina	G unif	6,4	7,7	7,1	1,21
Marron guaíba	2,9	1,6	Feldspatp alcalino quartzo sienito	M unif	4,7	6,2	5,5	1,32
Nero Absoluto	2,9	1,6	Augita-hiperstênio meladiorito	F	6,0	8,6	7,3	1,42
Rosso Vanga	2,6	1,6	Granito granofírico com biotita	MF	3,7	8,9	6,3	2,41
Rosso Tranas	3,5	1,5	Feldspato alcalino leucogranito	M	6,2	8,3	7,4	1,33
Sierra chica	3,5	1,5	Biotita granito	MG	6,0	8,3	7,2	1,37

LEGENDA: Granulação: F- fina; MF- média a fina; M-média; MG- média a grossa; G- grossa; G- grossa; GG muito grossa; unif- uniforme.

Os autores, que esperavam uma boa correlação do valor HK₇₅ com a serrabilidade, atribuem a baixa correlação encontrada tanto à imprecisão dos dados operacionais das serradas, obtidos com os produtores quanto à utilização de granalhas com desempenhos diferentes (tipo de material, angularidade e granulometria). Nesta publicação não há nenhum registro mais

específico (controle da lama abrasiva, tipo e condições do tear usado, etc.). Na prática, é mesmo de se esperar que não exista correlação nenhuma. Estudos deste tipo não devem ser feitos com base em dados de produção de diferentes teares.

CITRAN (2000) realizou um levantamento de publicações sobre algumas características mecânicas dos granitos ornamentais mais frequentemente utilizados nas serrarias italianas, com o objetivo de verificar se existia correlação entre as mesmas características e a serrabilidade no tear multilâminas a polpa abrasiva. As principais observações foram as seguintes:

- Não foram encontradas relações entre a serrabilidade e a densidade no caso de granitos compactos, enquanto a porosidade obviamente facilitava a serragem no caso em que fosse de entidade relevante, de 1,5 a 2% (até 25% como em alguns pórfiros e traquitos).
- Nenhuma relação foi evidenciada entre módulo elástico e dificuldade de serragem (diversos mármorem têm módulo elástico maior do o aquele de muitos granitos, mas se podem serrar também com os velhos teares de areia).
- Uma certa relação é bastante evidente entre a serrabilidade dos granitos com a resistência à compressão e ainda mais à tração/flexão. Puderam ser recolhidos, de diversas fontes, os valores destas duas características para cerca de setenta granitos comerciais e percebeu-se a que a serrabilidade diminui com o aumento destas resistências (que refletem a trama, a granulação e o grau de alteração dos minerais constituintes). A TABELA 2.5 apresenta alguns destes dados.

TABELA 2.5 – Relação entre serrabilidade, resistência à compressão e resistência à tração de alguns granitos italianos (CITRAN, 2000).

Serrabilidade*	Nome comercial	RCU (MPa)	RT (MPa)
Fácil	Amarello	100	8,9
Fácil	Rosa Baveno	170	11
Média	Rosa Porrino	187	11,9
Média	Rosso Balmoral	191	11,8
Difícil	Pietra di Luserna	213	22
Difícil	Nero Zimbabwe	275	26,5

LEGENDA: RCU – resistência à compressão uniaxial; RT – resistência à tração; * as classes de serrabilidade foram adotadas pelo autor em função do consumo de energia, de lâminas e de granalha.

Pelos trabalhos de FORNASERO *et al.* (1988) e CITRAN (2000) fica evidenciado o fato de que a rocha – o material a serrar – não tem sido estudada com maior aprofundamento, fazendo com que importantes correlações não possam ser efetuadas (textura, grau de microfissuramento, grau de alteração dos minerais, ensaios mais específicos, entre outros aspectos).

2.5.4 – SERRABILIDADE DOS GRANITOS EM TEARES PENDULARES

A serrabilidade pode ser entendida como a maior ou menor facilidade com que é possível executar na rocha um sulco ou entalhe, normalmente de espessura superior à da lâmina em cerca de 2 a 5mm. O tipo de material está, obviamente, entre os parâmetros que influenciam a serragem.

Assim sendo, conhecida a dureza dos diferentes materiais a serrar, pode-se ter uma idéia tanto da facilidade com que esses mesmos materiais serão serrados quanto do custo operacional envolvido. Em geral, o custo por metro quadrado serrado é mais elevado para materiais mais duros.

Embora seja freqüentemente utilizado o termo dureza, é mais correto falar em serrabilidade dos vários materiais, uma vez que alguns granitos considerados como macios para a serragem com lamas abrasivas são duros se forem cortados com ferramentas diamantadas e vice-versa.

A serrabilidade (o contrário de dificuldade de serragem) não tem relação com a composição petrográfica dos granitos, existindo sim alguma ligação com a compacidade e os aspectos texturais dos seus constituintes.

Isto se verifica, pois é mais fácil de serrar os materiais mais porosos que, devido a alterações, possuem uma estrutura mais frágil. Além disso, o intemperismo (físico e químico) pode originar produtos de alteração muito mais friáveis do que os materiais originais.

De acordo com PERFETTI (1992), as microfissuras ou pequenas fendas existentes no interior dos cristais concorrem para um enfraquecimento da estrutura cristalina dos materiais, conforme atestam os estudos realizados por BERRY *et al.* (1989), ANTOLINI *et al.* (1989) e HENNIES & STELLIN JÚNIOR (2000).

O quartzo, por exemplo, possui um coeficiente de dilatação linear térmica duas vezes superior ao da massa restante em seu redor o que origina, durante o período de arrefecimento, o aparecimento de microfissuras que irão facilitar a operação de serragem, o que também explica por que razão o quartzo, mesmo sendo mais duro que o feldspato segundo a escala de Mohs, é, na realidade, desagregado mais facilmente.

Por outro lado, é mais difícil serrar os materiais compactos, ou aqueles onde os vazios estejam preenchidos por minerais cimentantes, tornando a rocha mais homogênea com a união dos cristais.

Outra característica que deve ser considerada é a maior ou menor tendência de “empastamento” dos fragmentos de rocha desprendidos no decorrer da serragem, aumentando ou diminuindo a viscosidade da polpa inicial.

Se estes fragmentos tiverem pouca capacidade de agregação entre si, produzirão lamas pouco consistentes e com baixas viscosidades. Por outro lado, a ocorrência de ligações mais

fortes entre as partículas da mistura levam a um maior grau de agregação e a viscosidades altas. Como os materiais têm diferentes serrabilidades e os resíduos que são gerados na serragem apresentam comportamentos distintos, cada granito terá uma mistura abrasiva com a composição adequada para a sua serragem.

Para materiais muito duros e compactos, a lama deve ser muito rica em granalha fina com alguma quantidade de granalha grossa e deve ter viscosidade baixa, sendo a abrasão e o choque dinâmico os processo mais importantes na sua serragem.

Por outro lado, os materiais brandos com tendência a empastar serram melhor com maior quantidade de granalha grossa ao aumentar o atrito entre o granito e a granalha arrastada pelas lâminas. A viscosidade deve ser mais elevada, sendo que as descargas a mantém relativamente estável, por meio da eliminação da granalha mais fina. Para estes materiais, a destruição da estrutura se dá por desagregações devidas a pressões e depressões hidrodinâmicas da lama nos espaços intercristalinos após a descida e a subida das lâminas.

De forma simplificada, PERFETTI *et al.* (1992) apresentam na TABELA 2.6 como devem variar as quantidades relativas de granalha grossa, viscosidade e a velocidade de descida durante uma serragem para os dois grandes grupos de materiais.

TABELA 2.6 – Quantidades relativas de granalha, viscosidade e velocidade de descida em função do tipo de material (PERFETTI *et al.*, 1992)

Materiais rochosos	Granalha grossa	Viscosidade	Velocidade de descida
Compactos	Menor quantidade	Baixa	Baixa
Porosos	Maior quantidade	Maior	Mais alta

CITRAN (2000) disponibiliza uma série de informações a respeito da serrabilidade de granitos em teares multilâminas, com base em publicações de sua autoria e levantamentos de dados operacionais e econômicos da serragem não apenas de rochas italianas, mas também daquelas estrangeiras utilizadas nas serrarias italianas.

A serrabilidade refere-se à facilidade com que uma rocha é serrada. Portanto, como exemplo, afirma-se que um granito é de difícil serragem quando ele é serrado lentamente com elevado consumo de energia, de lâminas e de granalha de aço.

Nesta questão, CITRAN (*op.cit.*) comenta que, em função de sua serrabilidade, os granitos são divididos geralmente em cinco classes: fáceis, fáceis a médios, médios, médios a difíceis e muito difíceis. Este autor examinou as informações e controles de várias serrarias italianas referentes ao período entre 1974 e 1995, abrangendo aproximadamente quinhentos tipos de granitos comerciais. A TABELA 2.7 apresenta a variação de serrabilidade para cinquenta granitos deste total.

TABELA 2.7 – Serrabilidade de granitos beneficiados em serrarias italianas (CITRAN, 2000).

FÁCEIS	MÉDIO FÁCEIS	MÉDIOS	MÉDIO DIFÍCEIS	MUITO DIFÍCEIS
Serizzo chiaro	Baltic Brown	Rosso Vanga	Nero Zimbabwe	Marinace
Serizzi	Blanco Castilla	Rosso Funil	New Imperial R.	Sucuru
Nero Tijuca	Juparaná Brasil	Bianco Sardo	Verde Marina	Nero Uruguay
Giallo Veneziano	Sardi rosa	Bianco Cristall	Verde Lavras	Juparana African
Saint Luis	Ghiandone	Rosso Balmoral	Silversea Green	Camelia Pink
Amarello	Labrador Scuro	Azul Claro	Azul Bahia	Rubin India
Trachiti	Marron Guaiba	Kinawa	Pietra Luserna	Tranas Rubin
Pietra Serena	Nero Impala	Carmen Red	Nero Guinea	Azul Brasil
Arenaria	Kashmir White	Marina Pearl	Nero Belfast	Violetta Saudi A.
Peperini	Berrocal	Rosa Porrino	Capão Bonito	Sierra Chica Red

Sucessivamente, graças à cooperação de numerosas serrarias, este autor recolheu dados práticos sobre algumas grandezas características da serragem (velocidade de cala, consumo de granalha e de lâminas, consumo de energia elétrica, etc.). Destes numerosos dados, alguns dependem do material serrado, mas principalmente do tear utilizado (por exemplo, a velocidade de cala); outros quase exclusivamente do material serrado e da qualidade das lâminas (o consumo de lâminas); outros ainda seja do material serrado quanto do tipo de tear, de granalha e do sistema de automação (consumo de granalha). Alguns exemplos escolhidos entre os mais significativos são apresentados na TABELA 2.8.

TABELA 2.8 – Produção de serrarias italianas e a serrabilidade dos granitos (CITRAN, 2000).

VELOCIDADE DE CALA EM REGIME			
Instalações do tear		Moderadas	elevadas
Granito muito difícil	mm/hora	10 – 12	17 - 20
Granito médio	mm/hora	18 – 20	30 - 35
Granito muito fácil	mm/hora	22 – 25	50 - 55
CONSUMO DE LÂMINAS (mm de lâmina por metro de altura serrado)			
Granito muito difícil	mm/metro		30 - 35
Granito médio	mm/metro		20 - 25
Granito muito fácil	mm/metro		8 - 12
CONSUMO DE GRANALHA (kg de granalha por metro quadrado serrado)			
Tear de qualidade e conduta		Modestas	ótimas
Granito muito difícil	kg/m ²	6 – 8	4 - 6
Granito médio	kg/m ²	3 - 3,5	2,1 – 2,6
Granito muito fácil	kg/m ²	1,8 – 2,5	1,0 – 1,8
CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA			
Granitos		Fáceis	difíceis
Anos 1990 – 1996	(kWh/m ²)	9 – 11	15 - 19
Anos 2000	(kWh/m ²)	4 – 6	8 – 15

Em relação à seleção de blocos de diferentes naturezas numa mesma carga, deve ser mencionado que, com frequência, as exigências comerciais são priorizadas em detrimento das considerações técnicas. Muitas vezes elege-se um bloco com altura similar ao que é necessário serrar para não se perder tempo na fase inicial da serragem. Contudo, o critério ideal é o agrupamento de blocos de materiais com serrabilidade e compacidade semelhantes e que formem misturas abrasivas com viscosidades facilmente controláveis.

2.6 EQUIPAMENTOS PARA DETERMINAÇÃO DA RUGOSIDADE DE SUPERFÍCIES

Uma maneira simples de avaliar a rugosidade de uma superfície é deslizar um dedo através da mesma. De modo similar, nos perfilômetros tradicionais um apalpador move-se ao longo de uma dada linha superficial, sendo medidos seu deslocamento e a altura da superfície relativa ao perfil. Com base neste princípio, RENGERS (1970) desenvolveu o primeiro perfilômetro para o registro mecânico de rugosidade. A partir da década de 80, o avanço tecnológico dos computadores possibilitou o desenvolvimento de sistemas mais rápidos e sofisticados.

Uma classificação dos principais métodos disponíveis atualmente para a mensuração da rugosidade é apresentada na FIGURA 2.9. Eles são agrupados em duas categorias principais, dependendo se eles fornecem dados bi ou tridimensionais. Os diferentes sistemas foram divididos de acordo com a proposta de GRASSELLI (2001), tendo sido abordados diversos aspectos, tais como velocidade e acuracidade do sistema, precisão e resolução das medidas e duração das mensurações e da análise dos dados.

FIGURA 2.9 – Métodos disponíveis de medição da rugosidade (GRASSELLI, 2001).

2.6.1 – SISTEMAS QUE FORNECEM DADOS BIDIMENSIONAIS

Os métodos de mensuração 2D mais comuns podem ser classificados como de contato ou sem contato. Eles são descritos a seguir.

a) Métodos com contato

Dentre os métodos de contato, perfilômetros com apalpadores mecânicos ou eletrônicos dão mensurações precisas ao longo de perfis.

Na indústrias metalúrgica e mecânica, a medição da rugosidade de superfícies é geralmente realizada por perfilômetros mecânicos. CARPINETTI *et al.* (2000) descreveram os componentes básicos destes equipamentos (FIGURA 2.10). O apalpador (“stylus”) é movimentado por um carro através da superfície e o transdutor de posição converte os movimentos verticais do apalpador em sinais elétricos. O deslocamento vertical do apalpador é medido em relação a uma superfície (datum). Em alguns rugosímetros, as guias do carro definem a referência vertical. O sinal elétrico é amplificado vertical e horizontalmente e convertido em valores dimensionais: a amplitude é convertida de uma unidade elétrica (volts) para uma unidade dimensional (mm) e a distância percorrida é convertida de uma unidade temporal (período de tempo) para uma unidade dimensional (mm).

FIGURA 2.10 – Componentes de um perfilômetro mecânico (NOVASKI, 1994).

Alguns exemplos de aplicação destes métodos na mensuração de superfícies rochosas são apresentados a seguir.

Um perfilômetro *stylus* foi utilizado por KULATIKE *et al.* (1995) na medição da rugosidade da superfície em um modelo de junta. As amostras também foram submetidas a ensaios de cisalhamento. Os perfis foram obtidos em seis direções na superfície da junta. Ao longo de cada perfil, foram feitas leituras a cada 0,2mm com uma precisão de 0,01mm.

Eles caracterizaram a superfície da junta usando dimensão fractal e sugeriram que a rugosidade foi modelada por fractais afins. Os autores também propuseram um novo critério do pico da resistência ao cisalhamento considerando as condições de rugosidade.

SPÍNOLA (1998) desenvolveu um equipamento laboratorial para a mensuração da rugosidade superficial de chapas de três tipos de granitos portugueses serrados em teares e que apresentam características petrológicas e físico-mecânicas distintas (FIGURA 2.11). Foi utilizado o parâmetro amplitude máxima da rugosidade (R_t) para se determinar, na prática, o volume de material a ser removido para que as chapas serradas tivessem sua espessura retificada.

A autora verificou as seguintes correlações entre a operação de serragem e as propriedades tecnológicas dos granitos: R_t aumenta na razão inversa da densidade; R_t é diretamente proporcional à porcentagem de feldspatos e R_t tende a aumentar com o aumento da porosidade e diminuir com o aumento da resistência à compressão simples.

FIGURA 2.11- Ilustração do rugosímetro desenvolvido por SPÍNOLA (1998) para medição de amostras das chapas brutas de granitos (Departamento de Minas e Georecursos do Insituto Superior Técnico, Lisboa).

Utilizando um moderno equipamento instalado no Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, LAUAND *et al.* (2000 e 2001) e MARTÍN CORTÉS *et al.* (2002) aplicaram a tecnologia de jato d'água pressurizada e misturada com abrasivo particulado ao corte de rochas ornamentais brasileiras (granitos “Preto Piracaia”, “Capão Bonito” e “Prata Interlagos” e mármore “Branco Mantiqueira”).

A avaliação pormenorizada da qualidade final das paredes de corte dos corpos de prova foi efetuada por MARTÍN CORTÉS (2003) no “DIGITA – Dipartamenti de Geoingegneria e Technologie ambientali di la università degli studi di Cagliari”, instituição que possui um equipamento mecânico de laboratório denominado Perthometro S3P (FIGURA 2.12). Este

rugosímetro apresenta um alto grau de precisão, mas foi projetado para realizar medições de rugosidades superficiais de corpos de prova pequenos, ficando o perfilamento restrito a menos de 6cm. Este autor verificou que: os melhores resultados de qualidade das superfícies das rochas testadas resultam da menor velocidade de translação do jato e que a rugosidade aumenta à medida que o jato d'água abrasivo perde coesão e se alarga.

(A)

(B)

FIGURA 2.12- (A) visualização do rugosímetro utilizado por MARTÍN CORTÉZ (2003) e (B) detalhe mostrando a varredura do estilete em amostra do granito Preto Piracaia.

Alguns trabalhos (WHIGHT & HOUSE, 1992; FRISA MORANDINI & TABOADA, 1993; BLASI *et al.*, 1995) têm sido realizados com o objetivo de normalizar um método que permita determinar a qualidade do acabamento superficial de placas de rocha.

WRIGHT & HOUSE (*op.cit.*) investigaram e compararam os resultados obtidos em rochas com um rugosímetro e com um instrumento de avaliação do brilho (através dos reflexos de luz emitidos pela superfície). Ambas as técnicas são bastante utilizadas nas indústrias metalúrgica e mecânica.

Estes autores concluíram que ambos os equipamentos são passíveis de serem utilizados na avaliação de superfícies de rocha. O medidor de brilho se mostrou eficaz na comparação do grau de acabamento em diferentes peças da mesma rocha, embora com algumas limitações: necessita de uma superfície nivelada e pode ser afetado pela porcentagem de quartzo presente na superfície em avaliação. Apesar de constituírem métodos rápidos e de fácil execução, necessitam de uma superfície seca e limpa. Verificaram ainda que o rugosímetro utilizado é susceptível a vibrações, as quais se encontram presentes em todas as etapas de transformação das rochas.

FRISA MORANDINI & TABOADA (1993) e BLASI *et al.* (1995) investigaram e desenvolveram uma metodologia para a utilização de rugosímetros para definir o grau de polimento das rochas com base em três parâmetros (R_a , R_z e R_{max}). Com o objetivo de obtenção de uma metodologia unificada do uso deste equipamentos, os últimos autores avançaram com

uma proposta de pré-norma ao Comitê Europeu de Normatização (CEN), tendo em vista a definição do estado de acabamento das superfícies acabadas.

Especialmente em países europeus, o uso de placas de mármore como revestimento de fachadas tem aumentado substancialmente durante as últimas décadas. A durabilidade de tais placas tem sido satisfatória, mas problemas como a deformação ao longo do tempo, a perda de resistência e o abaulamento de algumas placas apontam para a necessidade de se aumentar o conhecimento de aspectos relacionados à seleção e previsão da vida útil de placas de mármore usadas em fachadas (COHEN & MONTEIRO, 1991).

Neste sentido, SCHOUENBERG (2003) desenvolveu um equipamento específico para a medição detalhada do abaulamento de placas de mármore usadas como revestimento de fachadas de prédios de grandes cidades européias. O protótipo do instrumento, denominado “Bow-Meter”, oferece flexibilidade e precisão de 0,2mm (FIGURA 2.13).

(A)

(B)

FIGURA 2.13 - (A) Esquema do “Bow-meter” e (B) Medição do abaulamento de placas de mármore em ambiente externo. Fontes: TEAM (2000, 2004).

Resultados preliminares de utilização do “Bow-meter” em fachadas do Banco Nacional de Copenhague mostraram diferentes padrões e razões para o abaulamento observado (SCHOUENBERG, 2003). O microclima e suas variações parecem ser importantes parâmetros. Comparando a variação das diferenças de temperatura dos painéis (dia e noite) com os correspondentes abaulamentos observados (FIGURA 2.14), observa-se uma tendência para abaulamento côncavo dos painéis se a diferença de temperatura é relativamente alta, enquanto há uma tendência para abaulamento convexo quando a diferença de temperatura é menor que 10° C.

FIGURA 2.14 – Exemplo do padrão de abaulamento em fachadas do Banco Nacional de Copenhague, Dinamarca (SCHOUENBERG, 2003).

b) Métodos sem contato

Os perfilômetros a laser, equipamentos pneumáticos, sistemas acústicos e ultrasônicos constituem os métodos de mensuração bidimensional sem contato citados na literatura.

A necessidade de não “tocar” e danificar as feições superficiais, a necessidade de mais rapidez e as novas possibilidades de uso abertas pelo desenvolvimento da informática, permitiram a adoção dos perfilômetros laser - em vez dos mecânicos - que utilizam feixes ópticos. Além disto, SODHI & TILIOUINE (1996) comentam que este método pode ser usado a uma certa distância da superfície que está sendo medida e é capaz de medir a rugosidade superficial em área e não apenas em um único perfil.

No perfilômetro laser, as mensurações da superfície e a aquisição dos dados são em geral capturados automaticamente por meio de um computador.

Entre os inúmeros tipos de equipamento a laser existentes no mercado, merece destaque o perfilômetro desenvolvido pelo Laboratório de Tribologia e Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (FIGURA 2.15), o qual

complementa uma nova metodologia para o estudo da abrasão por meio da caracterização estatística da topografia superficial do material estudado.

FIGURA 2.15 – Perfilômetro laser utilizado pelo LTM da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (MELLO & TRINDADE, 1997).

Neste equipamento, o laser emite uma radiação luminosa monofeixe sobre a superfície. Este raio de luz é refletido após incidir na superfície. Ao realizar o retorno passa por um detector onde é produzido um sinal elétrico, correspondente à distância entre o ponto focal e a superfície que está sendo medida. Os movimentos verticais que o foco sofre ao varrer a superfície são então convertidos em sinais elétricos, por meio de um transdutor, sendo depois avaliados pelo aparelho de medição. Em função do pequeno diâmetro do ponto focal, mesmo as menores irregularidades da superfície podem ser amostradas. A resolução deste método é vinculada ao diâmetro do feixe, que normalmente varia de 0,3 a 2,0mm.

Segundo GRASSELLI (2001), uma importante fonte de erro na mensuração de perfis de rugosidade com esta técnica está relacionada à refração da superfície, que depende da presença de cristais de quartzo. Isto significa que pode ser difícil de mensurar acuradamente a textura superficial de granitos ornamentais, que contêm granitos ou outras feições que causem refração utilizando-se o perfilômetro laser.

Uma técnica diferente para avaliar a qualidade superficial de rochas ornamentais foi desenvolvida em Moscou pelo Instituto de Investigação Científica de Mensuração.

Após uma análise e investigação dos diferentes métodos de mensuração com e sem contato, o método pneumático foi estabelecido como o mais adequado para a avaliação da rugosidade superficial de rochas. No caso destes materiais naturais, além do microrelevo, suas superfícies são constituídas por microfissuras e diferentes arranjos minerais. Por este motivo, KAINER *et al.* (1996) relata que os perfilômetros tradicionais não devem ser utilizados, pois foram primordialmente desenvolvidos para outros fins.

De acordo com estes autores, esta técnica pneumática baseia-se na medição de dimensões lineares da quantidade de ar comprimido que passa através de uma abertura anelar, formada pelo final da agulheta e pela superfície refletora. Se a superfície não é plana, o ar não passa através da fenda, mas sim através das microrugosidades da superfície.

A FIGURA 2.16 mostra o fluxo do ar através das microrugosidades correspondendo a uma abertura de altura h . A agulheta é pressionada contra a superfície e o valor deste fluxo de ar permite então avaliar o acabamento da superfície. Este sistema pode ser utilizado durante as fases de produção. No entanto, apresenta algumas restrições, tais como a sua calibração ou o fato do fluxo de ar ser influenciado pela altura e forma do perfil avaliado. Além disto, não permite a obtenção dos parâmetros característicos da rugosidade e deve estar graduado de acordo com uma amostra padrão (certificada). Percebe-se que somente um rigoroso controle das amostras permite a calibração dos aparelhos pneumáticos com valores capazes de caracterizar a qualidade da superfície.

FIGURA 2.16– Equipamento pneumático utilizado para avaliação da qualidade superficial de rochas (KAINER *et al.*, 1996), onde: h – altura determinada pela variação do fluxo de ar através de uma superfície refletora de forma plana; h' – altura equivalente determinada pela variação do fluxo de ar através de uma superfície refletora com irregularidades microscópicas; D – diâmetro; 1 – agulheta; 2 – coroa e 3 – refletor.

Em relação aos sistemas acústicos e ultrasônicos, GRASSELLI (2001) comenta que apesar da rapidez de leitura, estes equipamentos não têm uso difundido por não possuir resolução espacial suficientemente adequada para à mensuração de rugosidades superficiais de rochas.

2.6.2 – SISTEMAS QUE FORNECEM DADOS TRIDIMENSIONAIS

a) Máquinas tridimensionais de medição

Com o intuito de investigar a rugosidade de superfícies por meio da obtenção de dados tridimensionais, alguns trabalhos encontrados na literatura se referem às máquinas tridimensionais de medição laboratoriais. A aquisição das informações é controlada por programas desenvolvidos especificamente para esta finalidade e executada por meio de computadores.

SILVA (1998) estudou os parâmetros de descrição de rugosidade de descontinuidades rochosas em blocos de itabiritos do Quadrilátero Ferrífero (MG), de dimensões aproximadas de 50cm de comprimento, 40cm de largura e 30cm de espessura. Para tanto, o autor também validou a utilização de uma máquina de medição tridimensional computadorizada na varredura de rugosidades de pequena escala. Este equipamento foi adquirido pelo Laboratório de Mecânica de Rochas do Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da USP para uso normal na caracterização dimensional de alta precisão na construção de máquinas e ferramentas da indústria mecânica (FIGURA 2.17).

FIGURA 2.17 – Máquina de medição tridimensional utilizada por SILVA (1998).

Os valores médios da varredura, realizada com ponta seca, com dimensão mínima de 0,1mm e máxima de 20mm sobre 25 amostras ao longo de uma média de 20 linhas por amostra, espaçadas de 5, 10 ou 20mm, foram: comprimento do perfil = 28,9cm; variação de altura = 7,63mm; pontos por linha = 105 e resolução de 1 mm.

As principais dificuldades operacionais encontradas por SILVA (*op.cit.*) foram: necessidade de regular a pressão sobre a ponta de varredura para se manter o contato sobre a

superfície da amostra e penetração do estilete em material de menor resistência, depressões ou fraturas da superfície da descontinuidade, o que levou à utilização de uma camada uniforme de resina sobre a superfície.

Os equipamentos acima descritos são caros, de uso exclusivamente laboratorial e seus comprimentos máximos de varredura são insuficientes para a medição da rugosidade em chapas de granito. Por tais características, são impróprios para tal finalidade.

b) Fotogrametria

Em relação aos métodos de medição da rugosidade superficial de juntas rochosas, muitos trabalhos têm investigado a morfologia das juntas mais rigorosamente, em modo tridimensional, considerando tanto a anisotropia como feições volumétricas (LANARO *et al.*, 1998; XIE *et al.*, 1999). Nesta direção, é crescente o desenvolvimento de sistemas não contato que permitem a mensuração integral da superfície para se obter dados tridimensionais diretamente em uma direção.

Um dos primeiros enfoques foi baseado em imagens estereoscópicas da superfície (fotogrametria terrestre) usadas para calcular a elevação da superfície em uma malha regular. Uma interessante aplicação deste método foi realizada por SEKER & TAVIL (1996), que estudaram o efeito da rugosidade de placas polidas no ganho de energia solar de superfícies externas de prédios. O parâmetro de rugosidade (R_a) de placas com a mesma coloração e estrutura foram calculados de acordo com dados obtidos por um estudo fotogramétrico de detalhe, conforme exemplificado na FIGURA 2.18.

A absorção solar (a) dos materiais foi avaliada por meio de um método experimental. Os autores encontraram uma correlação entre os dois parâmetros expressa pela seguinte equação de regressão: $a = 0,23 R_a + 0,08$, com $R^2 = 0,97$. Esta avaliação numérica mostra o efeito da rugosidade superficial na absorção solar de um material: quando R_a de uma superfície clara aumenta 1mm, o aumento da energia absorvida pela superfície é de 23%. Para SEKER & TAVIL (*op.cit.*), isto é o resultado de uma maior possibilidade de um raio refletido de qualquer ponto da superfície atingir o objeto novamente. Eles concluíram que na seleção de placas pétreas para uso em fachadas externas, a rugosidade superficial das mesmas influencia significativamente o ganho de calor devido à radiação solar.

Outro exemplo desta categoria é a técnica utilizada por JESSEL *et al.* (1995) *apud* GRASSELLI (2001) para superfícies de fraturas. Eles aplicaram uma técnica fotogramétrica digital para mensurar a anisotropia da rugosidade com alta acuracidade. Para GRASSELLI (*op.cit.*), pelo contrário, este procedimento é relativamente moroso e, em geral, não é preciso o suficiente para a mensuração de rugosidade de superfícies de juntas.

(A)

(B)

FIGURA 2.18- Exemplos de figuras e respectivos perfis de rugosidade obtidos por meio do método fotogramétrico desenvolvido por SEKER & TAVIL (1996): amostra lisa (A) e amostra rugosa (B). O comprimento máximo da perfilagem foi de 40cm.

c) Interferometria

Outro método que aborda a mensuração integral de uma superfície rugosa é a interferometria. Diferentes tipos de instrumentos que utilizam este princípio óptico para a caracterização tridimensional de micro topografia são apresentados na literatura (LEE & HUANG, 1991; HILLMAN *et al.*, 1996; WYANT & SCHMIDT, 1998; GLEYZES *et al.*, 1998, WANG *et al.*, 1998).

A interferometria utiliza “franjas” de interferências produzidas quando raios laser e feixes monocromáticos são refletidos de uma superfície rugosa e de uma superfície plana de referência. Na prática, as franjas correspondem aos contornos de rugosidade em intervalos de aproximadamente a metade do comprimento de onda da luz utilizada. Pela análise de imagens digitais dos padrões das franjas é possível então calcular a rugosidade. A calibração extremamente precisa do sistema e o uso de uma superfície referencial plana constituem as principais restrições deste método (GRASSELLI, 2001).

d) Câmeras de mensuração tridimensionais de superfícies

O desenvolvimento de câmeras de carga acoplada (“CCDs – *charge cupled devices*”) possibilitaram o estudo e análise da rugosidade de superfícies usando diretamente um computador pessoal, sem qualquer procedimento manual.

Estas câmeras digitais de mensuração tridimensionais de superfícies (“*range cameras*”) são bastante variadas, conforme as aplicações desejadas. Elas se diferenciam pelos princípios ópticos em que se baseiam, sendo que a maioria delas utilizam a triangulação óptica ou tempos de retardo gerados pela movimentação da luz em um determinado meio (KIRAN *et al.*, 1998).

Por exemplo, o scanner laser utilizado por LANARO *et al.* (1998) projeta um feixe laser muito fino na superfície rugosa, que é filmada por duas câmeras de alcance em um padrão estereográfico. O feixe laser move-se automaticamente sobre a amostra, e os dados coletados são processados por um computador pessoal. O resultado é uma imagem topográfica tridimensional da rugosidade da amostra com uma precisão de aproximadamente 50mm. Este sistema incorporou vantagens do uso de diferentes técnicas (a precisão da luz coerente e da triangulação óptica) e, conseqüentemente, otimizou um sistema para mensuração da rugosidade de superfícies de rocha.

Pelas considerações feitas a respeito dos perfilômetros e demais sistemas de mensuração, observa-se que são equipamentos laboratoriais ou que servem geralmente para a avaliação de superfícies acabadas. Eles permitem a obtenção de parâmetros de rugosidade de perfis ou áreas superficiais, mas as varreduras efetuadas são pouco extensas.

Não existe equipamento disponível para a avaliação da textura superficial de rocha com irregularidades de maiores dimensões, o que é normalmente dificultada pela presença de poros, microfissuras ou pequenos sulcos provocados pelo arrancamento de minerais e agravada pelas condições adversas nas serrarias de granitos (poeira, ruídos, vibrações, umidade, etc.).

2.7 CARACTERIZAÇÃO DA TEXTURA SUPERFICIAL DE CHAPAS BRUTAS

Assim como para outros materiais, também para as rochas beneficiadas é possível definir a sua textura superficial por meio da avaliação da mensuração de suas irregularidades.

Existem vários métodos utilizados para a medição destas irregularidades (WRIGHT & ROUSE, 1993; BLASI *et al.*, 1995), sendo geralmente utilizados para a verificação da qualidade do acabamento superficial de placas polidas de rocha.

No entanto, conforme será tratada detalhadamente no Capítulo 5, a definição da qualidade superficial das chapas obtidas na serragem é feita de forma empírica. Neste sentido, estudos têm sido realizados com foco no desenvolvimento de equipamentos capazes de avaliarem a rugosidade ao longo de toda a largura das chapas produzidas (SPÍNOLA, 1998; RIBEIRO *et al.*,

2005a), a fim de se estabelecer um controle de qualidade mais pormenorizado da operação de serragem nos teares.

2.7.1 - TIPOS DE IRREGULARIDADES SUPERFICIAIS

No desdobramento dos blocos de rochas ornamentais, a maior ou menor freqüência de irregularidades nas superfícies das chapas brutas pode estar relacionada tanto com as condições operacionais da serragem como as características da rocha.

As irregularidades (textura superficial) podem ser classificadas em duas categorias (TABELA 2.9, FIGURA 2.19), dependendo dos seus comprimentos de onda: as de grande escala (erros de forma) e as de pequena escala (ondulação, rugosidade e defeitos).

TABELA 2.9 - Classificação das irregularidades de uma superfície

CATEGORIA	TIPO	CARACTERÍSTICAS
Grande Escala	Erro de forma	Razão espaçamento/altura ≥ 1000 ; pode representar eventuais empenos de chapas.
Pequena Escala	Ondulação	Razão espaçamento/altura 100-1000; representa as irregularidades mais extensas, mais largas, de nível superior ao da rugosidade; o comprimento de avaliação é superior ao utilizado para a determinação da rugosidade: a rugosidade encontra-se sobreposta ao perfil macrométrico da ondulação.
	Rugosidade	Razão espaçamento/altura 5-100; na prática, representa as irregularidades micrométricas e finamente espaçadas.
	Defeitos	Falhas que podem estar incluídas na medição da superfície, normalmente indicadas por inspeção visual: presença de poros, fissuras ou pequenos sulcos provocados pelo arrancamento de minerais no processo de serragem.

Fonte: modificado de FRISA MORANDINI & OGGERI (1992) e BLASI *et al.* (1995)

FIGURA 2.19 – Tipos de irregularidades superficiais: E - erro de forma; O - ondulação; R - rugosidade e D – defeitos (FRISA MORANDINI & OGGERI, 1992; BLASI *et al.*, 1995).

2.7.2 – TERMINOLOGIA

Os vários métodos existentes para a caracterização da textura superficial têm em comum a avaliação das alturas dos perfis, das dimensões longitudinais e das formas das irregularidades. Dentre as terminologias existentes, normalmente a mais utilizada se baseia em uma linha central ou linha média. São definidas as seguintes grandezas (FIGURA 2.20):

- Comprimento de Avaliação (L): é o comprimento medido ao longo da linha média que compreende vários comprimentos de amostras, normalmente em número de cinco.
- Perfil (P): perfil da superfície.
- Linha média ou linha central (M): é a linha de referência paralela à direção geral do perfil ao longo do comprimento de avaliação. As áreas limitadas por estas linhas são iguais para ambos os lados.
- Comprimento da amostra (LN)
- Comprimento total (LT): é o somatório das distâncias iniciais e finais e dos comprimentos das amostras.

FIGURA 2.20 -Terminologia adotada para a caracterização da rugosidade superficial de chapas brutas de granitos, onde L – comprimento de avaliação, P – perfil, M – linha média ou central, LN – comprimento da amostra (*cut-off*) e LT – comprimento total (SPÍNOLA, 1998).

2.7.3 - CARACTERIZAÇÃO DA TEXTURA SUPERFICIAL

São várias as normas (internacionais) existentes que definem uma grande variedade de parâmetros necessários para a caracterização da textura superficial. A seguir são apresentados, de forma sucinta, os parâmetros mais utilizados na mensuração da rugosidade de placas polidas (e raramente de chapas brutas) de mármore e granitos ornamentais, com base no trabalho de SPÍNOLA (1998).

- a) **Média aritmética da rugosidade (R_a)**: é o parâmetro da rugosidade mais utilizado, sendo expresso pela seguinte equação:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L [y] dx \quad (5)$$

onde: L é o comprimento de avaliação

Este parâmetro reflete a média dos valores absolutos de todas as ordenadas do perfil, dentro do comprimento de avaliação. Equivalente à altura de um retângulo de comprimento L e cuja área representa o somatório das áreas fechadas entre o perfil da rugosidade e a linha média. Em geral, o comprimento utilizado para se obter R_a inclui cinco conjuntos de picos-vales sucessivos, representado na FIGURA 2.21 pela letra M.

FIGURA 2.21 – Definição de R_a (SANDVIK, 1994 apud SPÍNOLA, 1998).

A principal limitação do uso do parâmetro R_a reside no fato de poder apresentar o mesmo valor para superfícies com perfis de rugosidade muito diferentes. Por isso, sua utilização deve ser acompanhada por outros parâmetros.

b) Altura média do pico-vale (R_z): representa a média aritmética das alturas (ordenadas) referentes aos cinco picos-vales mais elevados ao longo do comprimento de avaliação (FIGURA 2.22), sendo expresso pela seguinte fórmula:

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 y_{pi} + y_{vi} \right) \quad (6)$$

onde: p – pico e v – vale

FIGURA 2.22 – Definição de R_z (SANDVIK, 1994 apud SPÍNOLA, 1998).

c) Altura máxima do pico-vale: R_{max} (R_y , R_{ma} ou R_z): representa a distância entre duas linhas paralelas à linha média e que passam, respectivamente, pelos pontos mais alto e mais

baixo do perfil para um dado comprimento de amostra, normalmente entre cinco picos-vales (FIGURA 2.23).

FIGURA 2.23 – Definição de $R_{\max}$ (SANDVIK, 1994 *apud* SPÍNOLA, 1998).

Para um dado acabamento superficial os três parâmetros descritos mostram valores diferentes ($R_a < R_z < R_{\max}$), os quais obviamente decrescem com o avanço do processo de polimento. Segundo BLASI *et al.* (1995), em geral o parâmetro $R_{\max}$, que é o resultado de uma medida individual, é considerado menos significativo do que R_a e R_z , que representam a média de um número maior de mensurações dentro do comprimento de avaliação.

De acordo com a forma do perfil pode ser necessário um estudo mais detalhado, como por exemplo, quando a ondulação está combinada com os picos-vales da rugosidade. Neste caso, alguns parâmetros adicionais, descritos a seguir, podem ser de valia.

d) Amplitude máxima da rugosidade: R_t (R_h , R_d): representa a altura máxima do pico-vale do perfil ao longo do comprimento avaliado, sem referência ao comprimento das amostras (FIGURA 2.24).

FIGURA 2.24 – Definição de R_t (SANDVIK, 1994 *apud* SPÍNOLA, 1998).

e) Pico máximo acima da linha média (R_p): representa o valor do pico mais elevado acima da linha média do perfil. É obtido a partir do parâmetro R_{PM} , a seguir referido.

f) Altura média dos picos acima da linha central (R_{PM}): representa o valor da média aritmética dos cinco picos mais elevados acima da linha central do perfil de rugosidade, de cada comprimento de amostra L_N (FIGURA 2.25). Pode ser calculado por meio da seguinte equação:

$$R_{PM} = \frac{R_{P1} + R_{P2} + \dots + R_{P5}}{5} \quad (7)$$

FIGURA 2.25 – Definição de R_{PM} (SANDVIK, 1994 *apud* SPÍNOLA, 1998).

g) Profundidade da ondulação (W_t): constitui a amplitude máxima entre o pico-vale da ondulação com a rugosidade eliminada dentro do comprimento de avaliação (L), conforme mostrado na FIGURA 2.26.

FIGURA 2.26 - Definição de W_t (SANDVIK, 1994 *apud* SPÍNOLA, 1998).

2.7.4 - EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Ao realizarem ensaios com granitos ornamentais com vista a uma padronização da determinação da qualidade do acabamento final de superfícies polidas, FRISA MORANDINI & TABOADA (1993) e BLASI *et al.* (1995) sugerem a utilização de amostras mais representativas. Devem feitas, no mínimo, entre vinte e trinta mensurações individuais da rugosidade para a obtenção de valores médios mais confiáveis.

Isto é reflexo da heterogeneidade da rocha: em função das diferentes durezas dos minerais constituintes, por exemplo, as condições operacionais necessárias para polir os cristais de quartzo (mais duros) são mais severas em relação aos grãos lamelares de mica (mais macios).

BLASI *et al.* (*op. cit.*) comenta, ainda, a dificuldade para se definir valores limites de rugosidade para a caracterização dos diferentes acabamentos superficiais de uma ampla gama de rochas ornamentais. Para o controle operacional de qualidade, estes autores sugerem a utilização de amostra padrão de acabamento para cada tipo de rocha que vai ser polida. Neste caso, as quantificações da rugosidade poderiam detectar qualquer importância significativa entre o produto acabado e a amostra padrão.

Por meio do desenvolvimento de um equipamento específico para a avaliação da rugosidade em superfícies serradas (chapas), SPÍNOLA (1998) estabeleceu algumas correlações entre a qualidade da serragem de três granitos ornamentais portugueses e as diferentes características petrológicas e físico-mecânicas destas rochas:

- A amplitude máxima da rugosidade (R_t) é o parâmetro que quantifica a qualidade da serragem e que, na prática, representa a espessura do material a ser removida na etapa posterior de desbaste e de polimento das chapas brutas.
- O parâmetro R_t aumenta na razão inversa da densidade; há uma tendência de aumento de R_t com o aumento da porcentagem de feldspato.
- A porosidade e a resistência à compressão uniaxial são características influentes no parâmetro R_t , mas que não explicam por si só a sua variação (pois depende da textura da rocha): verificou-se a tendência para o aumento de R_t com o aumento da porosidade, assim como para a sua diminuição com o aumento de resistência à compressão uniaxial.
- A porcentagem de quartzo dificulta a operação de desbaste das chapas.

Finalizando, em virtude da observação da influência dos aspectos texturais da rocha na mensuração da rugosidade e no estudo de desbaste das chapas, a autora sugeriu o registro simultâneo de rugosidade e textura ao longo dos perfis ensaiados, bem como a realização de uma caracterização petrográfica mais aprofundada.

2.7.5 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DA SUPERFÍCIE ROCHOSA

Um dos primeiros passos para a análise computadorizada de um determinado perfil é a conversão das informações analógicas, representadas pelo perfil da superfície, em um grupo numérico de dados denominados ordenadas de amplitude. No momento em que as informações contidas em um perfil são capturadas numericamente, elas podem ser tratadas como um conjunto de dados estatísticos.

Os dados de amplitude do perfil de uma superfície podem ser tratados estatisticamente do mesmo modo, por exemplo, de dados de altura de pessoas de uma certa população. Uma superfície rugosa possui uma amplitude média maior quando comparada a uma superfície lisa. Da mesma forma, a população da Noruega apresenta altura média superior à verificada na população do Japão, por exemplo.

A análise estatística de um perfil de superfície se inicia com um perfil de altura ou uma curva de distribuição de amplitudes, como mostrado na FIGURA 2.27.

FIGURA 2.27 – Curva de distribuição de amplitudes (MUMMERY, 1992)

A curva de distribuição de amplitudes é uma representação gráfica da distribuição das alturas das ordenadas sobre a profundidade total do perfil. Suas principais são definidas matematicamente pelos chamados “momentos”, detalhados a seguir.

a) Média Aritmética do perfil: é o primeiro momento da função da probabilidade de distribuição das amplitudes. Por definição, a altura média de um perfil é igual a zero, podendo ser obtida pela seguinte equação:

$$m1 = y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n yi \quad (8)$$

onde y_i é a altura das ordenadas e n é o número de ordenadas.

b) Variância: a variância das alturas de um perfil constitui o segundo momento da função de probabilidade de distribuição das amplitudes. É um indicador das variações das alturas de um perfil (FIGURA 2.28). A raiz quadrada da variância é o desvio-padrão da curva de distribuição das amplitudes, ou o parâmetro de rugosidade Rq . Ela pode ser obtida por meio da seguinte expressão:

$$m2 = Rq^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (yi)^2$$

FIGURA 2.28 – Variância de duas curvas de distribuição das amplitudes (MUMMERY, 1992).

c) **Assimetria de distribuição (Skewness)**: é o terceiro momento da função de probabilidade de distribuição das amplitudes. A assimetria de distribuição (S_K) constitui um critério de avaliação do formato da curva de distribuição das amplitudes em relação à linha de referência do perfil. Ela pode ser expressa pela seguinte equação:

$$m3 = S_K = \frac{1}{(Rq)^3} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (yi)^3 \quad (9)$$

Uma curva de distribuição das amplitudes pode apresentar assimetria negativa ou positiva, conforme mostrado na FIGURA 2.29. Valores negativos de S_K são indicadores de uma concentração de material próxima ao topo do perfil e correspondem a uma superfície aplainada e com sulcos estreitos. Em caso contrário, quando S_K for positivo, a superfície é caracterizada por picos estreitos. Na prática, superfícies com S_K negativo são menos susceptíveis ao desgaste prematuro (CARPINETTI *et al.*, 2000).

FIGURA 2.29- Assimetria de duas curvas de distribuição de amplitudes (MUMMERY, 1992).

d) **Curtose (K_U)**: é o quarto elemento da função de probabilidade de distribuição das amplitudes. É uma medida da suavidade da curva de distribuição (FIGURA 2.30). Pode ser representada matematicamente pela seguinte expressão:

$$m4 = K_U = \frac{1}{(Rq)^4} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (yi)^4 \quad (10)$$

Como a curtose é função de quarta potência das ordenadas do perfil, ela é extremamente sensível a variações de valores de picos e vales. Valores baixos de Curtose ($K_U < 3$) correspondem a um perfil de superfície com muitos picos e vales arredondados. Pelo contrário, valores altos de Curtose ($K_U > 3$) indicam que as irregularidades presentes na

superfície são mais pontiagudas, isto é, são mais susceptíveis ao desgaste prematuro (CARPINETTI *et al.*, 2000).

FIGURA 2.30 – Curtose de duas curvas de distribuição de amplitudes (MUMMERY, 1992).

De acordo com MUMMERY (1992), momentos maiores da curva de distribuição das amplitudes podem ser calculados. Todavia, serão pouco relevantes à análise prática de texturas superficiais.

Existe ainda uma técnica estatística chamada de Autocorrelação, que consiste na comparação de diferentes partes de um mesmo perfil. Assim, ela serve para detectar o grau de similaridade ou repetição das características de um perfil. Se uma superfície apresenta uma distribuição aleatória e não possui ao menos dois segmentos do perfil idênticos, então sua Autocorrelação será baixa. Pelo contrário, uma superfície com distribuição periódica e repetições de segmentos em intervalos regulares, apresentará uma Autocorrelação alta (MUMMERY, *op.cit.*).

3. JAZIMENTOS BRASILEIROS DE ROCHAS ORNAMENTAIS E SELEÇÃO DOS TIPOS ESTUDADOS

O território brasileiro, devido à excepcional diversidade geológica do seu embasamento cristalino, é muito competitivo em termos de rochas ornamentais. Além dos materiais clássicos (que não sofrem influência de modismo) e comuns (de “batalha”, de largo emprego em obras de revestimento), a principal vantagem brasileira é possuir jazidas de materiais muito raros e de alta cotação comercial, sobretudo em nível internacional, tais como as do Azul Bahia e Azul Macaúbas, só encontrados no estado homônimo, ou as de rochas movimentadas, exclusivas de províncias geológicas brasileiras.

O perfil da produção, por tipo de rocha, e a sua distribuição pelas regiões e estados brasileiros, são mostrados nas TABELAS 3.1 e 3.2, respectivamente.

TABELA 3.1 – Produção brasileira de rochas ornamentais em 2002 (CHIODI FILHO, 2003a).

Tipo de Rocha	Quantidade (t)	Participação (%)
Granito	3.450.000	57,5
Mármore	1.000.000	16,5
Ardósia	500.000	8,3
Quartzito foliado	340.000	5,6
Pedra Piracema	200.000	3,3
Basalto	80.000	1,3
Quartzito Maciço	70.000	1,2
Pedra Cariri	60.000	1,1
Arenito	50.000	1,0
Pedra Sabão/Serpentinito	40.000	0,6
Pedra Morisca	10.000	0,1
Outros	200.000	3,3
Total	6.000.000	100

TABELA 3.2 – Produção de Rochas por Regiões e Estados Brasileiros (CHIODI FILHO, 2004a)

Região	Estado	Produção (t)	Tipo de Rocha
Sudeste	Espírito Santo	2.850.000	Granito e mármore.
	Minas Gerais	1.200.000	Granito, ardósia, quartzito foliado, pedra sabão, pedra talco, serpentinito, mármore e basalto.
	Rio de Janeiro	260.000	Granito, mármore e Pedra Piracema.
	São Paulo	80.000	Granito, quartzito foliado e ardósia
Norte e Nordeste	Bahia	500.000	Granito, mármore, travertino, arenito e quartzito.
	Ceará	250.000	Granito e Pedra Cariri.
	Paraíba	62.000	Granito e conglomerado.
	Pernambuco	50.000	Granito.
	Alagoas	15.000	Granito.
	Rondônia	15.000	Granito.
	Rio Grande do Norte	15.000	Mármore e Granito.
	Pará	3.000	Granito.
	Piauí	10.000	Pedra Morisca.
Sul	Paraná	320.000	Granito, mármore e outros.
	Rio Grande do Sul	140.000	Granito e basalto ⁽¹⁾ .
	Santa Catarina	80.000	Granito e ardósia.
Centro-Oeste	Goiás	150.000	Granito e quartzito foliado
Total		6.000.000	

⁽¹⁾ MOTOKI *et al.* (2003) citam que os basaltos que ocorrem nas porções maciças de derrames vulcânicos no Estado do Rio Grande do Sul apresentam a cor mais escura entre todas as rochas ornamentais do Brasil.

A diversidade dos ambientes geradores das rochas no Brasil, bem como a singularidade de sua história evolutiva em diferentes regimes geotectônicos e períodos geocronológicos da crosta terrestre, conferem padrões estéticos únicos a cada tipo de rocha, a cada afloramento e mesmo em cada amostra coletada em um mesmo afloramento.

Famosas por suas excelentes propriedades funcionais e pelos atributos estéticos extremamente diferenciados, resultado da combinação de estruturas (desenhos, movimentos), texturas (dimensão e arranjo de cristais ou conteúdo fóssil) e padrões cromáticos, as rochas brasileiras são consagradas entre especificadores e arquitetos do mundo inteiro. Cita-se o sofisticado e tradicional mercado italiano, um dos grandes importadores dos granitos brasileiros e os casos dos granitos usados no metrô de Osaka (no Japão), nas obras de expansão dos templos sauditas de Meca e Medina, e em fachadas de suntuosos edifícios dos Estados Unidos, Holanda e Nova Zelândia, entre outros tantos.

A tendência acentuada de comercialização das chamadas “rochas exóticas”, onde o padrão estético é mais importante do que as características tecnológicas da rocha, é observada nas feiras anuais de rochas ornamentais e de materiais de construção, como a Feira Internacional do Mármore e Granito - FIMAG (Vitória/ES) e Feira Internacional da Indústria da construção - FEICOM (São Paulo/SP).

Tratam-se de rochas de maior valor agregado, como exemplos: o “Louise Blue” (que custa cerca de US\$750,00/m²), os quartzitos “Purangaw Amazonia” e “Bambu Amarelo”, os metaconglomerados “Marinace”, “Caravaggio” e “Eleutério Green” e os arenitos “Wild West Green” e “Wood Stone”, que são quase que exclusivamente destinados ao mercado externo.

A seguir é apresentado um panorama dos jazimentos de rochas ornamentais no território brasileiro, tendo como base publicações científicas, técnicas e de catálogos comerciais (ARTUR *et al.*, 2004; ABIROCHAS, 2001, 2002; BARBOSA, 1995; CHIODI FILHO, 2003c, 2004a, 2004b; CBPM, 2002; DELGADO & PEDREIRA, 1994; EMC EDITORES ASSOCIADOS, 2004; FERREIRA, 2003; FRASCÁ *et al.*, 2000; FRAZÃO, 1993; HOLANDA *et al.*, 1987; MELLO, 1999; MELLO *et al.*, 2003; MENDES, 2002; MENDES *et al.*, 2002; MENDES & SANTOS, 2003; METAGO, 1999; MORAIS, 2001; MOTOKI *et al.*, 2003; RAJAB, 1998).

Em termos geológicos, a história geotectônica se estende do Arqueano ao Recente. Sua evolução é marcada por uma grande mobilidade tectônica com alternância de regimes compressivos e distensivos. Segundo MENDES (2002), a cratonização de seu embasamento e a conseqüente formação de jazimentos de rochas com fins ornamentais, ocorreram de maneira progressiva e cíclica, em pelo menos quatro eventos tectonomagmáticos, relacionados ao Arqueano, Paleoproterozóico, Mesoproterozóico e Neoproterozóico. Tais eventos propiciaram a consolidação do continente, formado por núcleos arqueanos de grande extensão, juntamente com fragmentos menores, envolvidos por faixas dobradas proterozóicas.

No tocante à geotectônica, o território brasileiro está dividido em oito Províncias Geológicas (FIGURA 3.1), todas passíveis de conter jazimentos de rochas ornamentais (MENDES, *op.cit.*):

- Os estados situados dentro da Província Mantiqueira (Espírito Santo, São Paulo, Rio de Janeiro, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul) são responsáveis por 58% da

produção nacional; seguido da Província São Francisco (Bahia e Minas Gerais), com cerca de 30%;

- A Província Borborema (que abrange os estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e porção norte da Bahia) é responsável por 10%, enquanto as Províncias Tocantins (Goiás e Mato Grosso do Sul), Amazonas Norte e Amazonas Sul, contemplam 2% do total do país.
- Apesar das Províncias do Paraná e Parnaíba não apresentarem produção de rochas ornamentais (dados de 2002), a diversidade geológica sugere a existência de sítios favoráveis à ocorrência deste importante insumo de nossa indústria extrativa mineral. Na TABELA 3.3, são listados alguns dos principais jazimentos, a classificação petrográfica do litotipo principal, o local de exploração e seu enquadramento geológico.

Deve ser ressaltado que, apesar do enorme potencial brasileiro em termos de jazimentos de rochas ornamentais, incluindo litotipos de beleza ímpar e grande aceitação mercadológica, se faz necessário, entre outras ações governamentais, ampliar as pesquisas de mapeamento geológico regional visando a descoberta de novas ocorrências.

Com informações consistentes, caberia ao setor privado alavancar um programa eficaz de prospecção e lavra de novos jazimentos e, conseqüentemente, impulsionar o crescimento do setor e o aumento da pauta de exportação.

FIGURA 3.1 - Províncias geológicas e alguns jazimentos de rochas ornamentais do Brasil (modificado de MENDES, 2002).

TABELA 3.3 - Jazimentos de rochas ornamentais do Brasil (modificado de MENDES, 2002).

Classificação Petrográfica	Província	Idade da Rocha	Nome Comercial	Procedência
Leucomonzodiorito	São Francisco	Arqueano	Snow Flocks	Iaçu –BA
Monzodiorito	São Francisco	Arqueano	Green Gabriela	Iaçu –BA
Charnockito verde	São Francisco	Paleoproterozóico	Verde Boa Nova	Boa nova – BA
Charnockito verde	São Francisco	Paleoproterozóico	Verde Candeias	Candeias – MG
Charnockito verde	São Francisco	Paleoproterozóico	Verde lavras	Lavras – MG
Leucogranito Gnaissificado	São Francisco	Paleoproterozóico	Branco Kashmir	Jequié – BA
Leucogranito	São Francisco	Paleoproterozóico	Cacatua Bahia	Anguera – BA
Trondhjemito	Borborema	Paleoproterozóico	Branco Cristal	Forquilha – CE
Trondhjemito	Borborema	Paleoproterozóico	Super Branco	Forquilha – CE
Trondhjemito	Borborema	Paleoproterozóico	Casa Branca	Pedra Branca – CE
Trondhjemito	Borborema	Paleoproterozóico	Cotton	Santa Quitéria – CE
Trondhjemito	Borborema	Paleoproterozóico	Branco Ceará	Santa Quitéria – CE
Trondhjemito	Borborema	Paleoproterozóico	Branco São Paulo	Santa Quitéria – CE
Ortognaisse Migmatizado	São Francisco	Paleoproterozóico	Mogno Bahia	Rui Barbosa – BA
Ortognaisse Migmatizado	São Francisco	Paleoproterozóico	Kinawa Bahia	Rui Barbosa – BA
Ortognaisse a Biotita	São Francisco	Paleoproterozóico	Macajuba	Rui Barbosa – BA
Ortognaisse Migmatizado	São Francisco	Paleoproterozóico	Tropical Bahia	Monte Santo – BA
Ortognaisse Migmatizado	São Francisco	Paleoproterozóico	Kinawa	Candeias – MG
Ortognaisse Migmatizado	Borborema	Paleoproterozóico	Rosa Imperial	Garanhus – PE
Ortognaisse Migmatizado	Borborema	Paleoproterozóico	Vermelho Relíquia	Pesqueira – PE
Ortognaisse Migmatizado	Borborema	Paleoproterozóico	Red Sinphony	Sobral – CE
Biotita Granito	Borborema	Paleoproterozóico	Yellow Sinphony	Sobral – CE
Ortognaisse Migmatizado	Borborema	Paleoproterozóico	Coliseum Gold	Caridade – CE
Ortognaisse Granítico	Mantiqueira	Paleoproterozóico	Amarelo Veneciano	Nova Venécia – ES
Ortognaisse Granítico	Mantiqueira	Paleoproterozóico	Arabesco	Águia Branca – ES
Ortognaisse Granítico	Mantiqueira	Paleoproterozóico	Santa Cecília	Ecoporanga – ES
Mela - Sienito	São Francisco	Paleoproterozóico	Café Bahia	Riacho Santana-BA
Diorito	Amazonas Sul	Paleoproterozóico	Preto Solimões	Jamari – RO
Riolito Pórfiro	São Francisco	Mesoproterozóico	Azul Paramirim	Paramirim – BA
Dumortierita Quartzito	São Francisco	Mesoproterozóico	Azul Imperial	Macaúbas – BA
Dumortierita Quartzito	São Francisco	Mesoproterozóico	Azul Macaúbas	Macaúbas – BA
Hornblenda Sienogranito	Amazonas Norte	Mesoproterozóico	Amazon Star	Machadinho do
Biotita Ortoclásio Granito	Amazonas Norte	Mesoproterozóico	Marrom Castor	Cacoal – RO
Sienogranito	Amazonas Norte	Mesoproterozóico	Amazon Flower	Ministro Andreazza-
Charnockito	Amazonas Norte	Mesoproterozóico	Blue Star	Machadinho do
Metarenito	São Francisco	Mesoproterozóico	Rosa Bahia	Palmeiras – BA
Metaconglomerado	Borborema	Neoproterozóico	Tropical Fashion	Parelhas – RN
Metaconglomerado	Borborema	Neoproterozóico	Tropical gaugan	Parelhas – RN
Metaconglomerado	Borborema	Neoproterozóico	Verde Reis Imperial	Santa Luzia – PB
Metaconglomerado	São Francisco	Neoproterozóico	Marinace	Ibotirama – BA
Metaconglomerado	São Francisco	Neoproterozóico	Verde Marinace	Ibotirama – BA
Calcário Cristalino	São Francisco	Neoproterozóico	Imperial Pink	Itapebi – BA
Calcário Cristalino Rosa	São Francisco	Neoproterozóico	Rosa Patamuté	Curaçá – BA
Mármore Rosado	São Francisco	Neoproterozóico	Flor de Pessego	Patamuté – BA
Mármore Branco	Mantiqueira	Neoproterozóico	Branco Extra	Gironda - ES
Calcários Pretos	Borborema	Neoproterozóico	Calcários Pretos	Frecheiras – CE
Biotita Granito	Mantiqueira	Neoproterozóico	Cinza Andorinha	Castelo – ES
Monzogranito	Mantiqueira	Neoproterozóico	Cinza Castelo	Castelo – ES
Biotita Granito Pórfiro	Mantiqueira	Neoproterozóico	Cinza Corumbá	Castelo – ES
Gnaisse	Mantiqueira	Neoproterozóico	Preto Indiano	Vargem Alta - ES

OBSERVAÇÃO - Os termos em negrito referem-se às rochas preliminarmente selecionadas para estudo.

TABELA 3.3 (continuação) - Jazimentos de rochas ornamentais do Brasil (modificado de MENDES, 2002).

Classificação	Província	Idade da Rocha	Nome Comercial	Procedência
Leucogranito	Mantiqueira	Neoproterozóico	Branco Marfim	Itaperuna – ES
Monzogranito Porfirítico	Mantiqueira	Neoproterozóico	Vermelho Bragança	Bragança Paulista–SP
Biotita Monzogranito	Mantiqueira	Neoproterozóico	Capão Bonito	Capão bonito – SP
Granito Porfirítico	Mantiqueira	Neoproterozóico	Colorado Gaúcho	Viamão – RS
Sienogranito	Tocantins	Neoproterozóico	Vermelho Brasília	Jaupaci – GO
Granito Porfirítico	Borborema	Neoproterozóico	Vermelho Ventura	Venturosa – PE
Granito Equigranular	Borborema	Neoproterozóico	Vermelho Ipanema	Pedra – PE
Granito Grosseiro	Borborema	Neoproterozóico	Verde Meruoca	Alcântaras – CE
Biotita Granito	Borborema	Neoproterozóico	Verde Ceará	Merouca – CE
Mela-sienito	Borborema	Neoproterozóico	Marrom Imperial	Bom Jardim – PE
Quartzo Sienito	Borborema	Neoproterozóico	Liláz Imperial	Bom Jardim – PE
Monzogranito	Borborema	Neoproterozóico	Rosa Iracema	Santa Quitéria – CE
Gabro-norito	Borborema	Neoproterozóico	Preto São Marcos	Casserengue – PB
Hornblenda Sienito	Mantiqueira	Paleoproterozóico	Ocre Itabira	Venda Nova – ES
Charnockito verde	Mantiqueira	Paleoproterozóico	Verde Labrador	Baixo Guandú –ES
Charnockito Verde	Mantiqueira	Neoproterozóico	Verde Ubatuba	Ubatuba – SP
Pegmatito	Borborema	Neoproterozóico	Branco Fuji	Parelhas – RN
Nefelina-Sodalita	São Francisco	Neoproterozóico	Azul Bahia	Itaju de Colônia-BA
Dacito Pórfiro	Borborema	Neoproterozóico	Azul Sucuru	Serra Branca – PB
Calcário Sedimentar	Borborema	Cretáceo Inferior	Crete Porto Fino	Quixeré - CE
Calcário Sedimentar	Borborema	Cretáceo Inferior	Bege San Marino	Limoeiro – CE
Travertino	São Francisco	Quaternário	Bege Bahia	Ourolândia - BA
Calcário Brechado	São Francisco	Quaternário	Travertino	Ourolândia - BA

OBSERVAÇÃO - Os termos em negrito referem-se às rochas preliminarmente selecionadas para estudo.

3.1 – TIPO DE ROCHAS ESTUDADAS E O CONTEXTO GEOLÓGICO

São selecionados preliminarmente seis tipos de rochas ornamentais apresentados na TABELA 3.4, levando-se em conta os seguintes fatores: a grande aceitação comercial, os aspectos estruturais e texturais e a diferença de serrabilidade (“dureza”). Três deles (“Preto Indiano”, “Vermelho Brasília” e “Verde Labrador”) são priorizados para o estudo integrado de suas características e a rugosidade superficial das chapas. O coeficiente de atrito dinâmico (descrito detalhadamente no Capítulo 4) é utilizado nestes tipos de granitos.

Todas as rochas, com exceção do sienogranito “Vermelho Brasília”, ocorrem no Estado do Espírito Santo, que responde por mais da metade da produção de rochas ornamentais do Brasil.

Por falta de publicações e cartas geológicas do Estado do Espírito Santo, efetua-se levantamento bibliográfico que compreende a recuperação das informações disponíveis sobre o contexto geológico, dados petrológicos e petrográficos das regiões de interesse para se obter um quadro sucinto das características de jazimento das rochas estudadas.

O gnaiss “Santa Cecília” constitui um material relativamente novo no mercado (em extração há menos de 10 anos) e com vários relatos de deterioração da superfície polida, após assentamento em piso, com uso de argamassa (FRASCÁ, 2003).

Segundo ALMEIDA & LETWINSKI (1984), uma das características marcantes desta área é ser constituída quase que exclusivamente de rochas pré-cambrianas e, também, de ser a menos conhecida da região oriental do país, devido a motivos diversos, como a profundidade de alteração intempérica dessas rochas, aliada à escassez de datações radiométricas e de mapeamentos geológicos de detalhe. Este fato parece persistir até hoje, visto a dificuldade encontrada para resgatar trabalhos geológicos recentes.

Em geral, essas rochas são gnaisses monzo a sienograníticas, com biotita, granada e silimanita, associação metamórfica indicativa de grau médio a alto. Constituem terrenos migmatítico-granulíticos, de idade Transamazônica, rejuvenescidos durante o ciclo Brasileiro (SCHOBENHAUS *et al.*, 1984), no setor setentrional da Província Mantiqueira (ALMEIDA & LETWINSKI, *op.cit.*).

Segundo FRASCÁ (*op.cit.*), são lavras em maciço, com uso de métodos modernos, que permitam alta produtividade, chegando-se à produção acima de 1.000m³/mês em alguma delas. Para o corte e levante da rocha, utiliza-se fios diamantados ou *flame jet*. O desdobramento em pranchas é realizado por meio do uso de marteletes, explosivos e/ou ponteiros.

Por sua vez, o charnockito comercializado sob a designação “Verde Labrador”, constitui outro tipo clássico no mercado produtor e é explorado na região de Baixo Guandu. Este corpo rochoso está incluído no Complexo Migmatítico-Granulítico de Minas Gerais (SCHOBENHAUS *et al.*, *op. cit.*). Normalmente durável, é relatado que pode exibir alteração de cor (clareamento) depois de fixado por argamassa, em fachadas.

As lavras são mecanizadas, com corte através de perfurações e uso de explosivos, e esquadreamento com uso de marteletes e de ponteiros. A exploração dá-se geralmente em altos topográficos, com algum capeamento. Os blocos são lançados por gravidade até cotas mais baixas, de onde são transportados para beneficiamento.

O migmatito “Preto Indiano”, o monzogranito “Cinza Castelo” e o sienito “Ocre Itabira” ocorrem no sul capixaba. Tectonicamente, esta região insere-se no “Cinturão Móvel Costeiro”, definido por ALMEIDA *et al.* (1981) como uma faixa de evolução policíclica, dentro da qual se inclui um domínio de idade essencialmente brasileira, referido como Cinturão Móvel Ribeira.

A FIGURA 3.2 apresenta o posicionamento da região de Cachoeiro de Itapemirim em relação à subdivisão da porção sul do estado do Espírito Santo em domínios tectono-estruturais (VIEIRA, 1997), os quais encontram-se limitados por expressivas zonas de cisalhamento dúcteis de direção NNE/SSW.

TABELA 3.4 – Relação dos tipos rochosos selecionados e regiões produtoras.

ROCHA		REGIÃO PRODUTORA (ESTADO)	CARACTERÍSTICAS GERAIS	COR	⁽³⁾ “DUREZA”
NOME COMERCIAL	TIPO PETROGRÁFICO				
Preto Indiano	^(1,2) Gnaisse tonalítico a monzogranítico/granodiorítico	Vargem Alta - Iconha (ES)	Granulação média, bandamento gnáissico definido	Preto	Baixa
Vermelho Brasília	⁽¹⁾ Sienogranito	Jaupaci (GO)	Granulação grossa, isotrópico	Vermelho	Alta
Cinza Castelo	⁽¹⁾ Monzogranito	Castelo (ES)	Granulação fina, isotrópico	Cinza	Média
Ocre Itabira	⁽¹⁾ Hornblenda quartzo sienito	Venda Nova (ES)	Granulação grossa; fracamente orientado	Marrom a castanho	Média
Santa Cecília	^(1,2) Biotita gnaisse monzogranítico com granada e silimanita	Ecoporanga (ES)	Granulação grossa, fortemente orientado	Amarelo	Baixa
Verde Labrador	Charnockito (Hiperstênio sienogranito) com granada	Baixo Guandu (ES)	Granulação grossa, isotrópico	Verde	Média

⁽¹⁾ Lê Maitre (1989); ⁽²⁾ Winkler (1976); ⁽³⁾ O termo “dureza” corresponde à serrabilidade dos granitos em teares multilâminas, ou seja, o tempo em que um bloco é serrado.

Estimativas fornecidas pelas empresas de serragem de granitos.

FIGURA 3.2 – Domínios tectono-estruturais no Cinturão Móvel Ribeira (modificado de VIEIRA, 1997), onde: DOC – Domínio Ocidental; DAM – Domínio de Arco Magmático; DOR – Domínio Oriental; FCI – Fragmento de Crosta Inferior (Domínio Litorâneo). A linha tracejada corresponde à região de Cachoeiro de Itapemirim/ES.

De acordo com os trabalhos de SILVA (1993) e VIEIRA (1997), o migmatito “Preto Indiano”, o monzogranito “Cinza Castelo” e o sienito “Ocre Itabira” fazem parte de unidades geológicas relacionadas ao magmatismo granítico ocorrido durante o Ciclo Brasileiro e que foi gerado em sucessivos estágios orogênicos de evolução do Cinturão Móvel Ribeira.

O migmatito “Preto Indiano” corresponde aos ortognaisses denominados Virgínia Velha (FEBOLI, 1993) de idade Proterozóico Superior e que constituem uma faixa alongada de direção NE-SW situada principalmente na porção sudeste do sul capixaba e que apresenta uma paisagem formada por grandes edifícios rochosos, com desníveis de até 800m entre a base e o topo do morro. Os vales são amplos e encaixados. A altitude oscila desde 100m na parte sul do corpo até 1100m mais para norte.

O litotipo dominante é um gnaiss granitóide leuco a mesocrático, de cor branco-acinzentada, granulação média a grosseira e porfiroblástico. Tem uma foliação muito regular e bem definida por agregados lenticulares biotíticos com anfibólio associado. São comuns enclaves de anfibólito, anfibólio gnaiss, metadiorito e gnaiss aluminoso.

O monzogranito “Cinza Castelo” é uma das rochas que constituem o Maciço Castelo. Este corpo ígneo intrusivo, circular e pós-tectônico, situa-se a cerca de 10km a nordeste da cidade honônima, posicionado a norte de Cachoeiro de Itapemirim. Seu eixo maior tem direção NE-SW e o relevo é bastante acidentado, sendo o Pico de Forno Grande o ponto mais alto, com

2.039m. Segundo FEBOLI (1993), os tipos litológicos mais expressivos são titanita granito, granito grosseiro porfirítico, dioritos e granodiorito porfirítico. O titanita granito aflora na parte externa do corpo. É de granulação fina a média, de cor cinza a cinza clara e constituído de quartzo, microclínio, plagioclásio, biotita e esfero. Apresenta estruturas de fluxo, xenólitos de rochas encaixantes e *schlieren* de composição diorítica.

O granito porfirítico grosseiro aflora na parte mais interna do corpo e é constituído por megacristais de feldspato alcalino de até 5cm de comprimento, que flutuam em uma matriz granítica de granulação média a grossa, de tonalidade cinza clara e composta de microclínio, quartzo, plagioclásio e biotita como minerais principais. Ocorrem dois tipos de dioritos: um de granulação média, equigranular e isotrópico e outro de granulação fina, coloração cinza escura e intensamente penetrado por veios de granulação grosseira porfirítica. Petrograficamente, essas rochas tem composição quartzo-diorítica em que o mineral máfico predominante pode ser a augita ou a hornblenda e, em menor proporção, o hiperstênio.

3.2 – AMOSTRAGEM E PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Após a escolha preliminar dos tipos graníticos para o presente estudo, planejou-se os trabalhos de campo para reconhecimento geológico dos corpos rochosos e a sistemática de extração dos corpos de prova, de tal modo que nos materiais movimentados ela representasse fielmente a posição em que os blocos são serrados para obter maior valor comercial.

A amostragem principal dos materiais para a realização dos ensaios e análises pretendidos foi realizada no período de 02 a 10/12/2003. Por meio de visitas às frentes de lavras das rochas situadas no sul capixaba (Preto Indiano, Cinza Castelo e Ocre Itabira), como mostrado nas FIGURAS 3.3 e 3.4, obteve-se pequenos blocos cúbicos com cerca de 40cm x 40cm x 40cm, na quantidade média de quatro para cada tipo de rocha. Transportou-se estas amostras para as empresas de beneficiamento.

A maioria dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos (dirigidos aos ensaios de compressão uniaxial, velocidade de propagação de ondas, dilatação térmica e tração na flexão) foram extraídos dos blocos (ou casqueiros) no local (FIGURA 3.5) para evitar transporte de grandes cargas para o laboratório.

Para isso, obteve-se autorização da Chefia do Departamento de Geotecnia para o transporte do extrator de corpos de prova com os amostradores (coroas diamantadas) adquiridos com a Reserva técnica da Fundação à Pesquisa no Estado de São Paulo.

Os materiais em forma de ladrilhos para os demais ensaios (análise petrográfica, dureza Knoop, abrasão profunda, atrito dinâmico, desgaste abrasivo Amsler e impacto de corpo duro) foram coletados pelo autor ou remetidos gratuitamente pelas empresas, incluindo as despesas de transporte. Deve-se ressaltar que esta franquia foi conseguida pelo interesse das empresas em

cooperar com a Universidade de São Paulo pelo bom nome que desfruta esta instituição e dos professores dedicados à pesquisa científica.

FIGURA 3.3 – Frente de extração do granito Preto Indiano, situada entre as cidades de Vargem Alta e Iconha/ES. Notar o corte perfeito do maciço executado com fio diamantado.

FIGURA 3.4 – Frente de extração do Ocre Itabira. Observar esquadrejamento de blocos. Região montanhosa próxima à cidade de Venda Nova dos Imigrantes/ES.

Nos laboratórios do Departamento de Geotecnia (EESC/USP), acompanhou-se a preparação das amostras a serem utilizadas nos ensaios. O aplainamento e o paralelismo das superfícies dos corpos de prova cilíndricos foram realizados por meio da utilização de torno, serra circular e serviços de retífica (FIGURAS 3.5, 3.6 e 3.7). Para os corpos de prova prismáticos, utilizou-se uma fresa especialmente adaptada para estas funções (FIGURAS 3.8 e 3.9).

FIGURA 3.5 – Funcionamento de extrator portátil para obtenção de corpos de prova cilíndricos (diâmetros de 70mm e 30mm) nas instalações da empresa Granitos Itabira Ltda. (Cachoeiro de Itapemirim/ES). A base deste versátil equipamento é fixada em qualquer superfície plana e lisa por um eficiente sistema à vácuo.

FIGURA 3.6 – Aplainamento dos corpos de prova cilíndricos realizado em torno mecânico do Departamento de Geotecnia (EESC/USP).

FIGURA 3.7 – Corte dos corpos de prova cilíndricos em serra circular. Departamento de Geotecnia (EESC/USP).

FIGURA 3.8 – Equipamento utilizado para se atingir o paralelismo dos topos e bases das amostras. Departamento de Geotecnia (EESC/USP).

FIGURA 3.9 – Fresa mecânica adaptada para o aplainamento e paralelismo das superfícies de corpos de prova prismáticos. Departamento de Geotecnia (EESC/USP).

FIGURA 3.10 – Detalhe mostrando o aparato de fixação da amostra. Observar funcionamento de coroa diamantada.

4 - PROCEDIMENTOS E RESULTADOS DOS ENSAIOS TECNOLÓGICOS

Na otimização do processo de serragem, é de suma importância que se considere a rocha “realmente como um produto natural”, lembrando que na sua gênese não existe controle de qualidade. Trata-se, portanto, de um material com diversidade em suas características e que necessita de um controle tecnológico desde da lavra até o lustro.

A caracterização tecnológica é feita por meio de ensaios que determinam as propriedades físicas e mecânicas e objetivam balizar os campos de aplicação dos materiais conforme padrões normatizados.

São realizados os seguintes ensaios rotineiros: análise petrográfica, desgaste abrasivo (Amsler), resistência à compressão uniaxial, índices físicos, velocidade de propagação de ondas, coeficiente de dilatação térmica linear, tração na flexão e resistência ao impacto de corpo duro.

Todavia, as propriedades determinadas por estes ensaios para utilização na construção civil, não necessariamente são as mais importantes para o estudo da serrabilidade das rochas ornamentais. Nesse particular, três outros, não convencionais, são executados: *abrasão profunda*, *microdureza Knoop* e *coeficiente de atrito dinâmico*.

SPÍNOLA (1998) utilizou a *abrasão profunda* para relacionar a qualidade da superfície serrada de chapas de granitos com o consumo energético da fase de polimento; QUITETE (2002) mostrou a validade do ensaio de *dureza knoop* em rochas brasileiras usadas em revestimentos; RIBEIRO *et al.* (2004a, 2004c; 2005c) e PARAGUASSÚ *et al.* (2005) observaram que a rugosidade das superfícies serradas (que reflete diretamente nos custos do polimento das placas) está relacionada à dureza das rochas e pode ser determinada diretamente ou através do *coeficiente de atrito dinâmico superficial*.

Para a realização dos ensaios apresentados conta-se com o apoio dos laboratórios da Escola de Engenharia de São Carlos (USP), Universidade Estadual Paulista (UNESP), Fundação Parque de Alta Tecnologia (PARQTEC) e Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo (IPT).

A seguir, são apresentados a descrição, os procedimentos e os resultados dos ensaios.

4.1 – PROPRIEDADES RELACIONADAS COM A SERRABILIDADE DOS MATERIAIS EM ESTUDO

4.1.1 – CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS

Com base nas diretrizes da norma EN 12407 (CEN, 2000), a análise petrográfica foi efetuada por meio de observação macroscópica e de microscopia óptica de luz polarizada em lâminas delgadas (espessuras na ordem de 30µm) extraídas das chapas em três direções ortogonais, uma delas paralela à superfície serrada. Devido à granulação relativamente grossa das rochas analisadas, a porcentagem modal foi determinada pela integração entre contagens minerais efetuadas diretamente sobre placas polidas por meio da utilização da técnica de coloração seletiva de feldspatos, segundo a metodologia de MORAES & RODRIGUES (1978), com auxílio de uma malha de espaçamento de 1cm lançada sobre plástico transparente, e em seções petrográficas sob microscópio realizadas com aparelho contador automático digital marca Swift.

“Granito” Preto Indiano é um migmatito com estrutura dobrada, exibindo diferentes intensidades de gnaissificação, responsável pelo maior ou menor grau de paralelismo entre os níveis paleossômicos e leucossômicos. O paleossoma apresenta cor cinza escuro, composição tonalítica, constituído predominantemente por andesina/oligoclásio (41,0%), quartzo (22,0%), biotita (23,0%) e microclínio (4,5%), além de sillimanita (5,0%) e muscovita (3,0%) e menos frequentemente por granada (1,0%) e cordierita (0,3%). O minerais acessórios (0,2%) são opacos, zircão, carbonatos, sericita e argilo-minerais. Apresenta textura granoblástica a granolepidoblástica, de granulação média, predominantemente entre 1,5 e 4,0mm. O leucossoma apresenta cor esbranquiçada, composição monzogranítica/granodiorítica, constituída essencialmente por andesina/oligoclásio (40,0%), quartzo (32,0%), microclínio (25,0%) e biotita (3,0%). Apresenta textura granular hipidiomórfica com granulação média (2,0 a 4,0mm) a média/grossa (5,0 a 10,0mm). Localmente, encontra-se parcialmente envolvido por delgados leitos biotíticos com sillimanita e muscovita, de textura lepidoblástica.

Em geral, a rocha exibe baixo microfissuramento e fraca alteração mineral. O microfissuramento é predominantemente intragrãos, sendo mais frequentes nos cristais maiores de feldspatos e de quartzo da porção leucossômica (FIGURA 4.1). As microfissuras são de pequena extensão e normalmente preenchidas por sericita e muscovita. A alteração mineral relaciona-se principalmente aos cristais de sillimanita, à alguns cristais de plagioclásio (que encontram-se de parcial a totalmente saussuritizados nas frações paleossômica e leucossômica) e à cordierita.

“Granito” Vermelho Brasília é um sienogranito, de coloração vermelha, inequigranular. A textura é hipidiomórfica e a granulação grossa, oscilando desde 3 mm até mais de 50 mm,

predominantemente entre 5 e 30 mm. Seus minerais essenciais são quartzo (32,0%), microclínio (41,0%), oligoclásio (16,0%) e biotita (5,0%); como acessórios (2,0%) opacos, apatita, zircão e granada e minerais secundários (< 4,0%) sericita, muscovita, epidoto, clorita, carbonatos, argilo-minerais e hidróxidos de ferro.

Estruturalmente, apresenta uma discreta orientação de fluxo, evidenciada basicamente por leve orientação preferencial dos cristais alongados de microclínio. O grau de microfissuramento é baixo, predominantemente intergranular, nos cristais de quartzo. Quando abertas, as microfissuras mostram-se preenchidas por minerais opacos, sericita e algum epidoto.

Os cristais de quartzo constituem de agregados de grãos anedrais, relativamente interligados entre si, irregulares a predominantemente alongados, homogeneamente distribuídos pela rocha, de forma a desenvolver uma verdadeira rede/malha que envolve os cristais de feldspatos (FIGURA 4.2). Esta feição estrutural relacionada à distribuição dos agregados de cristais de quartzo exerce grande influência na resistência à abrasão e à serragem.

Apresenta baixo grau de microfissuramento intragrão e, localmente, intergrão. Os cristais maiores são de microclínio, que geralmente apresentam contornos irregulares (devido a corrosão durante cristalização magmática), o que, apesar da granulação grossa, se reflete em bom imbricamento mineral e, conseqüentemente, na melhor coesão desta rocha. Destaca-se, também, o freqüente intercrescimento entre microclínio e oligoclásio (observável mesmo macroscopicamente). A alteração mineral é fraca a moderada, caracterizada por visível alteração em argilo-minerais dos cristais de feldspatos. Os cristais de plagioclásio são os mais afetados, principalmente em seus núcleos, além de exibirem discreta sericitização.

FIGURA 4.1 – (A) aspecto macroscópico do ladrilho submetido ao ensaio de coloração seletiva de feldspatos e (B) fotomicrografia do migmatito “Preto Indiano”: porção leucossômica com cristais de plagioclásios saussuritizados e quartzo com microfissuras intragrão.

FIGURA 4.2 – (A) aspecto macroscópico do ladrilho submetido ao ensaio de coloração seletiva de feldspatos e (B) fotomicrografia do sienogranito “Vermelho Brasília”. Notar a saussuritização sobre os cristais de plagioclásio, com formação de cristais de muscovita.

“Granito” Verde Labrador é um charnockito (hiperstênio sienogranito) com granada. Apresenta coloração verde-escura acastanhada e granulação de fina a grossa, variando de 2 a 25mm (predomina ao redor de 10mm). Seus minerais essenciais são quartzo (14,0%), microclínio (39,0%), oligoclásio (19,0%), biotita (5,0%), hiperstênio (5,0%), hornblenda (5,0%), granada (5,0%), como acessórios (5,0%) opacos, alanita, apatita e zircão e minerais secundários (< 3,0%) filossilicatos, carbonato e hidróxidos de ferro.

Apresenta estrutura maciça e um arranjo textural inequigranular hipidiomórfico, caracterizado por cristais subédricos a anédricos de feldspatos, milimétricos a centimétricos, e anédricos de quartzo. Em geral, os minerais máficos e opacos constituem agregados esparsos na rocha. A granada ocorre como porfiroblastos, subédricos a euédricos.

O grau de microfissuramento é intenso, o maior das rochas em estudo, predominantemente intergrão (FIGURA 4.3), configurando uma rede de microfissuras entrecortadas, preenchidas por filossilicatos e hidróxidos de ferro. Observa-se também microfissuras radiais em cristais de hiperstênio e hornblenda.

As transformações minerais são moderadas, evidenciadas pela alteração deutérica de feldspatos, a partir de microfissuras, em argilominerais e sericita, com hidróxidos de ferro associados. O hiperstênio encontra-se fortemente alterado ao longo e próximo de clivagens.

FIGURA 4.3 – (A) aspecto macroscópico do ladrilho submetido ao ensaio de coloração seletiva de feldspatos e (B) fotomicrografia do charnockito “Verde Labrador”. Notar o intenso microfissuramento intergranular.

4.1.2– MICRODUREZA KNOOP

A determinação da dureza Knoop em rochas ornamentais foi sugerida por MANCINI & FRISA MORANDINI (1982) e, desde então, vem sendo utilizada por diversos pesquisadores (CARDU *et al.*, 1994; SÁNCHEZ DELGADO *et al.*, 2005). Com os valores obtidos é construída uma curva de frequência acumulada, onde são obtidos os valores (HK – *hardness knoop*) relativos aos quartis 25%, 50% e 75%. O valor HK₇₅ se refere à influência dos minerais mais duros que afeta a abrasividade da rocha; o valor HK₂₅ é um bom indicador de desgaste por abrasão, onde os minerais de dureza baixa são efetivamente desgastados, enquanto que os minerais mais duros são removidos por escarificação; o valor HK₅₀ representa aproximadamente a dureza média da rocha. Até o presente, não há normas nacionais para realização do ensaio.

Para cada tipo de rocha, são utilizados 3 corpos de prova com dimensões 7x 7x 3cm e designados 1, 2 e 3. De acordo com a metodologia de QUITETE (2002), a dureza Knoop é determinada através de 40 impressões com carga de 1,96N em cada corpo de prova (FIGURA 4.4A).

O comprimento da diagonal é medido, em micrômetros, imediatamente após cada impressão, sob a objetiva de 50X (aumento total de 500X) com o auxílio da escala vernier no sistema da ocular do aparelho (Figura 4.4B). Quando a área de impressão fica danificada, impedindo a identificação das extremidades da diagonal, nova impressão é feita no mesmo grão mineral.

FIGURA 4.4 – (A) esquema das quarenta impressões realizadas em cada corpo-de-prova. Os números indicam a ordem em que são feitas as impressões e (B) impressão em cristal de quartzo do sienogranito “Vermelho Brasília”; comprimento da diagonal maior = 55,5μm.

Os resultados dos ensaios de *dureza Knoop* resumidos na TABELA 4.1 mostram que os valores da dureza média das rochas estudadas são similares. Entretanto, o migmatito “Preto Indiano” apresenta elevado coeficiente de heterogeneidade HK_{75}/HK_{25} , resultante de variações mais significativas nas impressões executadas, como reflexo das diferenças na gnaissificação envolvendo os níveis paleossômicos e os leucossômicos.

TABELA 4.1 – Resultados de dureza Knoop das amostras estudadas.

Rocha	Amostra	HK ₂₅	HK ₅₀	HK ₇₅	HK _{média}	HK ₇₅ / HK ₂₅
		(GPa)				
Preto Indiano	PI – 1	3,77	6,76	8,82	6,14	2,34
	PI – 2	1,48	5,78	8,90	5,27	6,03
	PI – 3	0,98	6,87	9,14	5,58	9,29
Vermelho Brasília	VB – 1	5,38	6,56	8,52	6,96	1,58
	VB – 2	5,39	8,74	9,31	7,39	1,73
	VB – 3	4,80	5,95	7,57	5,85	1,58
Verde Labrador	VL – 1	5,86	6,66	7,43	6,58	1,27
	VL – 2	6,08	6,66	7,75	6,97	1,27

4.1.3 – ABRASÃO PROFUNDA

O ensaio de abrasão profunda foi originalmente desenvolvido para ladrilhos cerâmicos e mede o comprimento da ranhura provocada por um disco de aço em uma superfície plana de um corpo de prova, utilizando-se a máquina Capon. COMAZZI *et al.* (1995) demonstraram a sua adequabilidade para medidas de abrasão em mármore e granitos e, desde então, tem sido usado para estudos em rochas ornamentais pelo Comitê Europeu de Normatização (GONZÁLEZ-MESONES, 2005).

Para a sua determinação, são utilizados 3 corpos-de-prova de 10x10x2cm de cada granito, obtidos pelo corte de ladrilhos comerciais.

Seguindo-se as diretrizes do Anexo E da norma NBR 13818 (ABNT, 1997a), cada corpo-de-prova é colocado no abrasímetro de modo a tangenciar o disco rotativo (FIGURA 4.5). O reservatório do equipamento é preenchido com alumina (grana 80) e ajustado para permitir um fluxo contínuo durante a rotação do disco.

FIGURA 4.5 – (A) abrasímetro disponibilizado pelo Parque de Alta Tecnologia de São Carlos (Parqtec) e (B) detalhe mostrando o disco rotativo tangenciando o corpo-de-prova.

Após o ensaio, em cada corpo-de-prova são medidos os comprimentos das cavidades conforme indicado na FIGURA 4.6. É estabelecido que o material deve apresentar um volume máximo de material removido por abrasão profunda menor ou igual a 175mm³.

A resistência à abrasão profunda é expressa em volume de material (mm³), calculado pelo comprimento da cavidade “C_{cav}” através da expressão:

$$V = \left(\frac{\pi x \alpha}{180} - \text{sen} \alpha \right) x \left(\frac{h x d^2}{8} \right) \quad (11)$$

sendo:

$$\frac{\sin \alpha}{2} = \frac{C_{cav}}{d} \quad (12)$$

onde: V = volume de material removido (mm³); d = diâmetro do disco rotativo = 200mm ± 0,2; h = espessura do disco = 10mm ± 0,1; α = ângulo correspondente ao arco (ranhura) deixado pelo disco e C_{cav} = comprimento da cavidade (mm).

FIGURA 4.6- (A) Medida do comprimento da cavidade (Ccav) e (B) Detalhe mostrando as cavidades impressas (material removido no ensaio) em amostra do migmatito “Preto Indiano”. Cada amostra foi desgastada em dois locais posicionados ortogonalmente.

Os valores médios da resistência à abrasão profunda apresentados na TABELA 4.2 indicam que os volumes de material desgastado do migmatito “Preto Indiano”(128,3mm³), do sienogranito “Vermelho Brasília”(120,6mm³) e do charnockito “Verde Labrador”(92,6mm³), atendem à exigência da norma NBR 13818.

4.1.4 – COEFICIENTE DE ATRITO DINÂMICO

Pode ser definido como a relação entre as força tangencial e vertical que atuam sobre a superfície ensaiada. MENEGAZZO (2001) avaliou o coeficiente de atrito dinâmico de granitos ornamentais, obtendo valores semelhantes ou então ligeiramente inferiores aos verificados em ladrilhos cerâmicos.

Para a sua avaliação é utilizado um equipamento denominado “scivolosímetro” (FIGURA 4.7A) que dispõe de um deslizador motorizado tipo “Tortus” que se movimenta com velocidade constante sobre a superfície ensaiada. De acordo com as diretrizes do Anexo N da norma NBR 13818 (ABNT, 1997b), inicialmente é montada uma pista com 40cm de largura por 200 cm de comprimento constituída por cinco ladrilhos. As medições são realizadas com superfícies secas e molhadas. O valor do coeficiente de atrito é classificado segundo a TABELA 4.3.

TABELA 4.2 – Determinações dos valores da resistência à abrasão profunda.

MATERIAL	CP	POSIÇÃO	C _{cav} (mm)		V (mm ³)	
			INDIVIDUAL	MÉDIA	INDIVIDUAL	MÉDIA
Preto Indiano	PI – 1	1	25,6	25,0	138,0	128,3
		2	25,1		128,6	
	PI – 2	1	25,0		127,3	
		2	25,0		126,8	
	PI – 3	1	25,1		129,6	
		2	24,5		119,6	
Vermelho Brasília	VB – 1	1	23,8	24,4	109,4	120,6
		2	21,2		75,9	
	VB – 2	1	24,7		123,5	
		2	26,3		148,9	
	VB – 3	1	25,1		128,6	
		2	25,6		137,7	
Verde Labrador	VL – 1	1	21,6	22,6	80,5	92,6
		2	22,8		95,9	
	VL – 2	1	23,1		99,6	
		2	21,8		82,2	
	VL – 3	1	23,3		102,4	
		2	22,8		95,2	

Com o objetivo de estabelecer as relações entre rugosidade e coeficiente de atrito dinâmico das rochas estudadas é adotada a seguinte rotina de medição: (i) nos materiais homogêneos são realizadas uma leitura na face polida e outra na face bruta (ortogonal às estrias da serragem); (ii) nos materiais heterogêneos são realizadas duas leituras na face polida, uma paralela e outra perpendicular ao bandamento gnáissico; na face bruta a direção é perpendicular às estrias da serragem (FIGURA 4.7B).

Depois de posicionado sobre a superfície da pista, o scivolosímetro percorre uma distância aproximada de 150cm. Para cada ladrilho são anotadas seis medidas e, então, os valores mínimos e máximos de coeficiente de atrito indicados no equipamento são calculados.

(A)

(B)

FIGURA 4.7 – Disposição dos ladrilhos do migmatito “Preto Indiano” para determinação do coeficiente de atrito dinâmico com “scivolosímetro”. (A) Superfície polida e seca, caminhamento perpendicular ao bandamento gnáissico e (B) superfície bruta e molhada, a seta branca indica o sentido de medição do coeficiente de atrito dinâmico, enquanto que a linha tracejada indica a direção das estrias de rugosidade.

TABELA 4.3 – Classificação do coeficiente de atrito dinâmico, de acordo com as diretrizes do Anexo N da norma NBR 13818 (ABNT, 1997b).

Coeficiente de atrito (adimensional)	Uso
$\mu < 0,4$	Satisfatório para instalações normais
$\mu > 0,4$	Recomendado para uso onde se requer resistência ao escorregamento

A TABELA 4.4 contém os valores médios do coeficiente de atrito dinâmico em superfície seca e molhada das rochas estudadas.

TABELA 4.4 – Valores médios de coeficiente de atrito dos granitos em superfície seca e molhada.

Rocha	Amostra		Coeficiente de atrito dinâmico (adimensional)	
	Face	Estrutura	Superfície seca	Superfície molhada
Preto Indiano	Polido	Paralela	0,50	0,43
		Perpendicular	0,54	0,45
	Bruta	Perpendicular	0,77	0,74
Vermelho Brasília	Polido	Ausente	0,57	0,49
	Bruta	Ausente	0,97	0,92
Verde Labrador	Polido	Ausente	0,40	0,36
	Bruta	Ausente	0,93	0,82

O charnockito “Verde Labrador” apresenta valores inferiores a 0,4, ou seja, segundo a norma NBR 13818 (ABNT, 1997b) é indicado para condições normais de uso. O migmatito “Preto Indiano” e o sienogranito “Vermelho Brasília” que apresentam valores superiores a 0,4, podem ser utilizados em locais onde se requer certa resistência ao escorregamento. Introduce-se este ensaio, como medida complementar da rugosidade da superfície serrada, para o estudo da serrabilidade de granitos, pois observa-se que quanto maior o valor do coeficiente de atrito dinâmico das faces brutas menor é a serrabilidade da rocha.

4.1.5 – RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO (AMSLER)

De acordo com a norma NBR 12.042 (ABNT, 1992a), são realizadas determinações da redução da espessura (em mm) de corpos de prova, extraídos de placas polidas, submetidos aos percursos abrasivos de 500m e 1000m na máquina Amsler.

Na TABELA 4.5 são apresentados os valores de resistência ao desgaste abrasivo dos granitos estudados.

TABELA 4.5 – Resultados dos ensaios de resistência ao desgaste abrasivo (Método Amsler).

Material	Amostra	CP	Desgaste (em mm) correspondente ao percurso de:			
			500m		1000m	
			Individual	Média	Individual	Média
Preto Indiano	PI – 1	1	0,49	0,49	0,92	0,98
		2	0,49		1,04	
	PI – 2	1	0,49	0,50	0,99	1,08
		2	0,51		1,17	
	PI – 3	1	0,64	0,55	1,22	1,15
		2	0,46		1,08	
Vermelho Brasília	VB – 1	1	0,25	0,26	0,55	0,54
		2	0,26		0,53	
	VB – 2	1	0,21	0,22	0,46	0,49
		2	0,22		0,51	
	VB – 3	1	0,23	0,24	0,48	0,50
		2	0,25		0,52	
Verde Labrador	VL – 1	1	0,38	0,37	0,84	0,84
		2	0,35		0,84	
	VL – 2	1	0,38	0,39	0,87	0,89
		2	0,40		0,90	
	VL – 3	1	0,37	0,38	0,80	0,84
		2	0,38		0,87	

Legenda: CP – corpo de prova.

4.1.6 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL

É determinada segundo a norma NBR 12767 (ABNT, 1992f) em uma prensa hidráulica servo-controlada com capacidade de 200t.

Em relação à rocha movimentada, são coletadas amostras em duas direções (FIGURA 4.8): uma paralela ao plano de serragem (amostra **F**) e outra perpendicular a este plano (amostra **L**). Tais direções não refletem a estruturação da rocha, mas sim o plano escolhido para a transformação em ladrilhos.

FIGURA 4.8 – Bloco esquemático de rocha movimentada (sem escala), orientado de acordo com a programação de serragem. Observar as direções de amostragem dos corpos de prova para determinação da resistência à compressão: **F** – frontal e **L** – lateral.

Os resultados da tensão de ruptura na compressão (C , em MPa), determinada pela relação:

$$C = \frac{W}{A} \quad (13)$$

onde: W – força de ruptura, em kN e A – área de carga do corpo de prova, em m^2 .

Como era de se esperar, a análise dos dados apresentados nas TABELAS 4.6 e 4.7 mostra uma clara relação proporcional entre as resistências ao desgaste abrasivo (RDA), a compressão uniaxial (RCU) e a serrabilidade das rochas estudadas. No material mais macio (Preto Indiano) tem-se RDA alta e RCU baixa e o contrário no outro extremo, o material mais duro (Vermelho Brasília).

TABELA 4.6 – Resultados dos ensaios de compressão uniaxial

ROCHA	CP	ÁREA (cm ²)	F (kN)	RCU (MPa)	
				Individual	Média
Preto Indiano	PI1 – L	40,039	454,29	113,46	108,71
	PI2 – L	40,881	419,95	102,73	
	PI3 – L	40,032	440,09	109,94	
	PI1 – F	41,923	436,48	104,11	104,47
	PI2 – F	41,116	431,03	104,83	
	PI3 – F	41,032	581,96	141,83**	
Vermelho Brasília	VB – 1	40,473	865,63	213,88	209,86
	VB – 2	41,418	849,20	205,03	
	VB – 3	40,488	852,91	210,66	
Verde Labrador	VL – 1	39,782	750,78	188,72	183,176
	VL – 2	40,772	734,71	180,20	
	VL – 3	40,896	738,60	180,60	

CP – corpo de prova; F – Força de Ruptura; RCU – Resistência à Compressão Uniaxial; ** Este corpo de prova era constituído quase que totalmente por quartzo (banda fêlsica) e, por isso, não foi considerado na média.

TABELA 4.7 – Sumário dos valores médios dos ensaios diretamente relacionados com a serrabilidade dos granitos estudados.

Rocha	CP	Petrografia	HK _{média} (GPa)	AP (mm ³)	CAD	RDA (mm/1000m)	RCU (MPa)	Serrabilidade
Preto Indiano	L	Migmatito	5.66	128,3	0,74	1,07	108,71	Alta
	F						104,47	
	S						-	
Vermelho Brasília	X	Sienogranito	6.73	120,6	0,92	0,51	209,86	Baixa
Verde Labrador	X	Charnoquito	6.78	92,6	0,82	0,86	183,18	Média

CP: corpo de prova; L: lateral; F: frontal; S: superior; X: materiais homogêneos; HK_{média} – dureza Knoop média; AP: abrasão profunda; CAD: coeficiente de atrito dinâmico; RDA: resistência ao desgaste Amsler; RCU: resistência à compressão simples.

4.2 – OUTROS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

Os ensaios de determinação dos índices físicos, da velocidade de propagação de ondas longitudinais, do coeficiente de dilatação térmica linear, da resistência à tração na flexão e da resistência ao impacto de corpo duro, embora diretamente não forneçam informações sobre a serrabilidade, são incluídos por serem de interesse ao uso da rocha como produto acabado e, também, por eventuais correlações com as propriedades anteriormente descritas.

4.2.1 – ÍNDICES FÍSICOS

Os valores de massa específica aparente seca, porosidade aparente e absorção d'água são determinados com base na norma NBR 12766 (ABNT, 1992e), que preconiza para cada tipo de rocha, a utilização de 10 amostras com 5 a 7cm de diâmetro.

A TABELA 4.8 apresenta os valores obtidos de índices físicos para as rochas estudadas.

TABELA 4.8 – Resultados obtidos de índices físicos

MATERIAL	MEAS (kg/m ³)	PA (%)	AA (%)
Preto Indiano	2.770	0,98	0,35
Vermelho Brasília	2.621	0,69	0,26
Verde Labrador	2.677	0,24	0,09

LEGENDA: MEAS – massa específica aparente seca; PA – porosidade aparente; AA – absorção d'água.

4.2.2 – VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS (V_p)

A determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas longitudinais (V_p), baseada na norma D 2845 (ASTM, 1969) é efetuada em 3 corpos de prova cilíndricos, com diâmetro aproximado de 3cm e relação diâmetro/altura de 1:2,5, sempre na condição seca. No caso do migmatito “Preto Indiano”, estes ensaios são determinados em amostras coletadas em duas direções (**F** e **S**) e que estão contidas no plano escolhido para a transformação em ladrilhos (FIGURA 4.9).

FIGURA 4.9 – Bloco esquemático de rocha movimentada (sem escala), orientado de acordo com a programação de serragem. Observar as direções de amostragem dos corpos de prova para determinação de V_p: **F** – frontal e **S** – superior.

A TABELA 4.9 apresenta os resultados das determinações da velocidade de ondas ultrassônicas longitudinais (V_p) de corpos de prova ensaiados.

TABELA 4.9 - Resultados da determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas.

MATERIAL	CORPO DE PROVA	V_p (m/s)
Preto Indiano	PI1 – S	4.371
	PI2 – S	4.316
	PI3 – S	4.011
	PI1 – F	5.078
	PI2 – F	5.101
	PI3 – F	5.098
Vermelho Brasília	VB – 1	4.916
	VB – 2	5.038
	VB – 3	5.194
Verde Labrador	VL – 1	3.510
	VL – 2	3.531
	VL – 3	3.555

4.2.3 – COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA LINEAR

Este ensaio é realizado seguindo-se as diretrizes da norma NBR 12765 (ABNT, 1992d). As medições são feitas nos mesmos corpos de prova submetidos aos ensaios de velocidade de propagação de ondas longitudinais. A TABELA 4.10 apresenta os resultados das determinações do coeficiente de dilatação linear das rochas estudadas.

4.2.4 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Também denominada flexão por carregamento em três pontos, ou ainda, módulo de ruptura, é regida pela norma NBR 12763 (ABNT, 1992b) e determina a tensão (MPa) que provoca a ruptura da rocha quando submetida a esforços flexores.

Para cada rocha, são ensaiados 3 corpos de prova, no estado seco. No caso do migmatito “Preto Indiano”, estes ensaios são determinados em amostras retiradas nas mesmas direções (F e S) dos corpos de prova destinados aos ensaios de velocidade de propagação de ondas longitudinais e de dilatação térmica linear (FIGURA 4.10).

A TABELA 4.11 apresenta os valores obtidos na determinação da resistência de tração na flexão de cada rocha estudada.

FIGURA 4.10 – Bloco esquemático de uma rocha movimentada, orientado de acordo com a programação de serragem. Observar as direções de amostragem: F – frontal e S – superior.

TABELA 4.10 – Resultados do ensaio de dilatação térmica linear; de acordo com as diretrizes da norma NBR 12765 (ABNT, 1992d).

Rocha	CP	L ₀ (mm)	Temperatura (°C)		Dilatação (mm)		CDTL (10 ⁻³ mm/m °C)
			Faixa Variação	ΔT	Faixa Variação	ΔL	
Preto Indiano	S1	61,91	0,0 x 50,2	50,3	0,999 x 1,026	0,027	β ₁ = 8,69
			50,2 x 0,2	50,0	1,0254 x 1,000	0,025	β ₂ = 8,20
		Média				CDTL = 8,45	
	S2	63,02	-0,1 x 50,6	50,7	1,001 x 1,030	0,029	β ₁ = 9,08
			49,9 x -0,1	50,0	1,030 x 1,001	0,029	β ₂ = 9,20
		Média				CDTL = 9,14	
	F1	63,48	0,0 x 50,3	50,3	1,000 x 1,024	0,024	β ₁ = 7,5
			50,2 x 0,0	50,2	1,024 x 0,999	0,025	β ₂ = 7,8
		Média				CDTL = 7,65	
	F2	63,25	0,0 x 50,2	50,2	1,000 x 1,020	0,020	β ₁ = 6,3
			50,2 x 0,1	50,2	1,020 x 0,998	0,022	β ₂ = 6,92
		Média				CDTL = 6,61	
Vermelho Brasília	VB1	62,93	0,0 x 50,0	50,0	-0,003 x 0,014	0,017	β ₁ = 5,4
			50,3 x -0,1	50,4	0,014 x -0,005	0,019	β ₂ = 6,0
		Média				CDTL = 5,7	
	VB2	62,98	0,0 x 50,0	50,0	1,000 x 1,017	0,017	β ₁ = 5,4
			50,1 x 0,2	49,9	1,017 x 1,000	0,017	β ₂ = 5,4
		Média				CDTL = 5,4	
Verde Labrador	VL1	61,14	0,0 x 50,4	50,4	1,000 x 1,024	0,024	β ₁ = 7,79
			50,4 x 0,0	50,4	1,024 x 1,000	0,024	β ₂ = 7,79
		Média				CDTL = 7,79	
	VL2	61,08	0,0 x 50,4	50,2	0,997 x 1,019	0,022	β ₁ = 7,15
			50,4 x 0,0	50,2	1,019 x 0,999	0,020	β ₂ = 6,49
Média				CDTL = 6,82			

LEGENDA: CDTL - coeficiente de dilatação térmica linear.

TABELA 4.11 – Determinação dos valores da resistência de tração na flexão.

Rocha	CP	Força de Ruptura (N)	Distância entre linhas (cm)	Largura CP (cm)	Altura CP (cm)	RTF (MPa)
Preto Indiano	PI-F	6.408	18,00	9,90	4,75	7,746
	PI-S	5.803	18,00	9,90	4,65	7,319
Vermelho Brasília	VB	9.390	18,00	9,90	4,65	11,844
Verde Labrador	VL	9.512	18,00	9,90	4,80	11,259

LEGENDA: CP – corpo de prova; RTF - resistência à tração na flexão

4.2.5 – RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE CORPO DURO

Com base na norma NBR 12764 (ABNT, 1992c), o ensaio é feito em cinco ladrilhos 20 x 20 x 3cm para cada tipo de rocha. A TABELA 4.12 apresenta os resultados destas determinações.

Os valores médios deste ensaio e dos outros já descritos são apresentados, de forma sucinta, na TABELA 4.13.

TABELA 4.12 - Resultados da determinação da resistência ao impacto de corpo duro.

ROCHA	CORPO DE PROVA	Ruptura (m)	
		Individual	Média
Preto Indiano	1	0,75	0,74
	2	0,75	
	3	0,80	
	4	0,70	
	5	0,70	
Vermelho Brasília	1	0,55	0,49
	2	0,45	
	3	0,45	
	4	0,50	
	5	0,50	
Verde Labrador	1	0,45	0,44
	2	0,45	
	3	0,45	
	4	0,40	
	5	0,45	

TABELA 4.13 – Valores médios dos ensaios de caracterização tecnológica do migmatito “Preto Indiano”, do sienogranito “Vermelho Brasília” e do charnquito “Verde Labrador”.

ROCHA	CP	MEAS (kg/m ³)	PA (%)	AA (%)	RTF (MPa)	CDTL	Vp (cm/s)		RICD (m)
							pré	pós	
Preto Indiano	L	2.770	0,98	0,35	-	-	-	-	0,74
	F				7,746	7,13	5.090	4.838	
	S				7,319	8,80	4.344	4,137	
Vermelho Brasília	X	2.621	0,69	0,26	11,844	5,55	4.977	4.753	0,49
Verde Labrador	X	2.677	0,24	0,09	11,259	7,31	3.586	3,327	0,44

LEGENDA: CP - corpo de prova; L - lateral; F - frontal; S - superior; X – materiais homogêneos; MEAS - massa específica aparente seca; PA - porosidade aparente; AA - absorção d’água; RTF - resistência à tração na flexão; CDTL – coeficiente de dilatação térmica linear; Vp - velocidade de propagação de ondas longitudinais e RICD: resistência ao impacto de corpo duro.

5 – DETERMINAÇÃO DA RUGOSIDADE DAS CHAPAS BRUTAS

5.1 – INTRODUÇÃO

O acompanhamento da serragem de blocos das rochas previamente selecionadas foi realizado na Granitos Itabira Ltda. (Cachoeiro de Itapemirim – ES) e na Granitos Brasileiros S.A. (Guarulhos – SP), e permitiu a familiarização com variáveis importantes na serragem, tais como: tempo de serragem, consumo de energia e de abrasivo, duração média das lâminas, por cada tipo de rocha beneficiada, além do ajuste, da renovação e da circulação da polpa abrasiva.

Os diferentes minerais que compõem os granitos possuem características particulares que respondem diferentemente ao conjunto das solicitações impostas na serragem. As proporções entre eles e as variações texturais como por exemplo: tamanho, forma, presença de megacristais, imbricamento dos cristais, grau de microfissuramento, grau de alteração, etc., podem ser responsáveis por diferenças na resistência à abrasão e ao impacto das lâminas nos teares.

O propósito de um estudo mais aprofundado relacionando os tipos de teares, os insumos (granalha e lâminas) e as condições operacionais do desdobramento de blocos é dificultado pela complexidade do processo de serragem e pela falta de padronização.

Constata-se que, na prática, a maneira eficaz de controlar a qualidade da serragem é a medida direta da rugosidade nas superfícies das chapas de granito. Ela é fundamental, pois define as condições operacionais do polimento.

No dia-a-dia das serrarias, esta avaliação é feita de forma empírica, por meio de inspeção tátil e visual, cujos resultados são obviamente subjetivos e não serviriam como base para um estudo da serrabilidade de granitos.

RIBEIRO *et al.* (2005c) observam que, no processo de serragem industrial de granitos, a rugosidade das superfícies serradas está relacionada tanto com as condições operacionais como as características da rocha. Sua determinação pode ser feita com perfilômetros de medições diretas ou indiretas.

5.2 – SISTEMAS DE MEDIÇÃO

Pelas considerações feitas no CAPÍTULO 2 a respeito dos perfilômetros e demais sistemas de mensuração de rugosidade, observa-se que não existe equipamento para medidas em grandes chapas de rocha (como as obtidas em teares) que possa ser usado nas condições adversas das serrarias de granitos (poeira, ruídos, vibrações, umidade, etc.).

A determinação da rugosidade também pode ser feita pelo coeficiente de atrito dinâmico (Ribeiro *et al.*, 2005a), medido com scilovosímetro. No entanto, atualmente, o alto custo deste equipamento inviabiliza sua utilização para esta finalidade.

5.3 - PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM RUGOSÍMETRO PORTÁTIL

Para medir a rugosidade de forma aceitável pelo mercado e prever de forma não empírica o custo do polimento das chapas serradas foi necessário construir um equipamento uma vez que não existe um tipo específico para esta finalidade. Isto foi um desafio porque se tornou necessário complementar a pesquisa originalmente proposta, resultando no desenvolvimento de um perfilômetro portátil, ao mesmo tempo robusto e de grande precisão (denominado “Avaliador de Rugosidade de Chapas - ARC”) para uso direto na indústria.

Ele permite medições de rugosidade inéditas nas literaturas nacional e mundial, tendo sido concebido para se estabelecer melhor relação da rocha com os insumos e os equipamentos de serragem.

Conforme mostrado na FIGURA 5.1, o “ARC” consiste das seguintes partes: corpo de aço (1) com pés ajustáveis por quatro parafusos para o nivelamento do sistema (2); carro de medição (3) com um defletômetro digital (precisão de 1µm) acionado por um sistema de braços ortogonais interligados; em que um deles é fixada a ponta de vídea que toca a superfície da chapa (ver detalhe). O carro de medição é deslocado por meio de uma rosca sem fim acionada manualmente contando-se os giros em um cilindro graduado (4) com precisão de 0,25mm. Por meio de uma conexão (5) e uma interface (6) as medidas do defletômetro são enviadas para um computador portátil (7) através de uma porta serial.

Na prática, os dados de medição do “ARC” podem servir ao serrador como um espécie de aferição de seu “feeling” quanto à sua experiência nos teares.

FIGURA 5.1 – Visão geral do “Avaliador de Rugosidade de Chapas - ARC” devidamente posicionado sobre uma chapa bruta de granito. Observar no detalhe, a medição das estrias (depressões e saliências) superficiais da chapa.

5.3.1 – MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE

As medidas sobre a superfície serrada são feitas no sentido ortogonal da serrada (altura da chapa) para o estudo integrado das variações da rugosidade.

Uma vez nivelado o ARC, estabelece-se uma referência horizontal sobre a chapa; gira-se o anel graduado movimentando horizontalmente o carro e no defletômetro (precisão de 1mm) vão sendo feitas as leituras no das depressões e saliências. O equipamento permite a adaptação de um motor servo-controlado (que pode ser motivo para trabalhos futuros) com uma interface para registro automático das medidas em um computador.

Como o “ARC” é apoiado sobre a superfície irregular da chapa, eventualmente, um dos apoios pode estar ou no sulco ou na saliência das estrias deixadas pelo processo de serragem. A horizontalização é feita pelo método dos mínimos quadrados (MUMMERY, 1992), conforme é apresentado na FIGURA 5.2.

FIGURA 5.2 – (A) Perfil medido e (B) perfil horizontalizado (MUMMERY, 1992).

Com o perfil horizontalizado, cálculos computacionais definem os parâmetros de rugosidade, sendo a amplitude máxima (R_t), descrita no CAPÍTULO 2 (FIGURA 2.24) a maior altura entre as depressões e as saliências no sentido do corte. Na prática, é a espessura do material a ser removido nas etapas de desbaste e polimento.

5.4 – ACOMPANHAMENTO DA OPERAÇÃO DE SERRAGEM

Estabeleceu-se uma cooperação técnico-científica entre a Granitos Brasileiros S.A. (Grupo Moredo) e o Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos, viabilizando o

estudo da serrabilidade de blocos de granitos em teares multilâminas. A empresa disponibilizou hospedagem e alimentação para que o acompanhamento, com duração média de quatro dias/bloco fosse contínuo e ainda permitiu o acesso aos dados internos de produção.

Além de otimizar o aprimoramento do protótipo do “ARC”, a integração com a referida empresa também estimula outras pesquisas (estudo de lama abrasiva e das interações rocha/inserts e rocha / pisos elevados). Na prática, esta empresa se caracteriza como um verdadeiro “laboratório industrial”.

Com esta parceria, leva-se a cabo o acompanhamento piloto e integral da serragem de blocos de dois tipos de granitos na unidade de Guarulhos/SP, incluindo a medição da rugosidade das chapas brutas obtidas. Estas atividades são realizadas com o cuidado de se evitar o mínimo de interferência na linha industrial de produção (FIGURAS 5.3 a 5.5).

Para o estudo comparativo das relações entre as principais propriedades e a rugosidade superficial das chapas medida pelo “ARC”, são escolhidos dois granitos comercializados como “Champagne Realengo” e “Vermelho Capão Bonito”. Os critérios para a escolha são: a semelhança mineralógica, a diferença de serrabilidade (“dureza”), a grande aceitação comercial e, principalmente, pela possibilidade do acompanhamento integral do processamento industrial desses dois tipos de rochas.

Além da análise petrográfica e da resistência à compressão uniaxial, é determinada a dureza das superfícies rochosas por meio dos ensaios Knoop e de abrasão profunda. Não é possível determinar o coeficiente de atrito dinâmico destes materiais, já que na linha industrial as chapas brutas são rapidamente cortadas em tiras, calibradas e então transformadas em ladrilhos.

FIGURA 5.3 – Utilização de guincho no transporte de chapa bruta de granito serrada em tear para posterior medição de sua rugosidade. Granitos Brasileiros S.A. (Guarulhos/SP).

FIGURA 5.4 – Disposição da chapa em bancada para posterior medição da rugosidade. Granitos Brasileiros S.A. (Guarulhos/SP).

FIGURA 5.5 – Execução de medidas de rugosidade diretamente na superfície de chapa bruta de granito com a utilização do ARC. Granitos Brasileiros S.A. (Guarulhos/SP).

O granito “Champagne Realengo” é classificado como um monzogranito, de coloração bege, com estrutura isotrópica a discretamente anisotrópico e aspecto homogêneo. Apresenta textura fanerítica hipidiomórfica a xenomórfica, de granulação média (3 a 6mm), predominando contatos minerais côncavos-convexos a imbricados, refletindo bom entrelaçamento mineral. A FIGURA 5.6 mostra parte de um ladrilho submetido ao ensaio de coloração seletiva de feldspatos (MORAES & RODRIGUES, 1978).

O microfissuramento é moderado (preferencialmente intergranular), presente tanto nos cristais de quartzo quanto nos de feldspatos, com planos preferencialmente preenchidos por agregados filossilicáticos. Os minerais essenciais são quartzo (28,0%), microclínio (35,0%), oligoclásio (26,0%) e biotita (7,0%); como acessórios (1,5%) apatita, zircão, muscovita e opacos e como minerais de alteração hidrotermal (<2,5%) sericita, epidoto, clorita e argilo-minerais.

O quartzo ocorre em cristais isolados e intesticialmente, variando entre 2 e 4mm, com contornos lobulados a parcialmente planares. O microclínio é o mineral de maior dimensão (até 15mm), com discreta pertitização e sericitização. O plagioclásio tem dimensões entre 3 e 6mm, encontrando-se intensamente saussuritizados, com o maior grau de microfissuramento intragrãos. A biotita é pouco freqüente, com lamelas isoladas e distribuição regular em toda a rocha.

FIGURA 5.6 – (A) fotomicrografia do monzogranito Champagne Realengo; (B) aspecto macroscópico do ladrilho submetido ao ensaio de coloração seletiva de feldspatos.

O granito “Vermelho Capão Bonito” (FIGURA 5.7) é classificado como um sienogranito, de cor vermelha com estrutura isotrópica e aspecto inequigranular. A textura é tipicamente hipidiomórfica, de granulação média a grossa (2 a 35mm), com predominância entre 5 e 10mm. Os contatos minerais são côncavos-convexos, freqüentemente interpenetrados, resultando em excelente imbricamento mineral.

O microfissuramento é baixo (preferencialmente intergranular), em geral nos cristais de quartzo. Os minerais essenciais são quartzo (34,5%), microclínio (40,5%), oligoclásio (15,5%) e biotita (6,0%); como acessórios (1,5%) opacos, apatita, esfeno, zircão e fluorita e minerais de alteração hidrotermal (<2,0%) sericita, muscovita, epidoto, clorita, carbonate e argilo-minerais.

O quartzo ocorre como preferencialmente sob forma de agregados de grãos anedrais com dimensões médias entre 3 e 4mm, podendo atingir até cerca de 10mm, formando verdadeira rede interligada (arcabouço ou matriz da rocha) que envolve os cristais de microclínio e plagioclásio, geralmente exibindo contatos interpenetrados com cristais de microclínio. Exibem nítido microfissuramento intragrãos. O microclínio ocorre com dimensões de até 35mm e é o responsável pela coloração vermelha da rocha. Seus contornos são nitidamente irregulares, resultando em uma excelente imbricação mineral. O plagioclásio tem dimensões médias entre 3 e 4mm, podendo atingir até 10mm. O grau de saussuritização é menor do que o do “Champagne Realengo”. O teor de minerais máficos é pouco expressivo (cerca de 5 a 6%).

FIGURA 5.7 - (A) fotomicrografia do sienogranito Vermelho Capão Bonito; (B) aspecto macroscópico do ladrilho submetido ao ensaio de coloração seletiva de feldspatos.

Os resultados dos parâmetros resistência à compressão uniaxial, dureza Knoop, desgaste Amsler e abrasão profunda estão dispostos na TABELA 5.1.

TABELA 5.1 – Resultados da Resistência à Compressão Uniaxial, Dureza Knoop, Desgaste Amsler e Abrasão profunda dos granitos estudados.

Propriedades	Granitos	
	Champagne Realengo	Vermelho Capão Bonito
Resistência à Compressão Uniaxial	154,9MPa	191,2MPa
Dureza Knoop	6.569MPa	6.489MPa
Desgaste Amsler	0,65mm	0,47mm
Abrasão profunda	136,3 mm ³	111,3 mm ³

Comparando-se as duas rochas, observa-se que apesar da mineralogia ser semelhante, elas são petrograficamente muito diferentes e que:

Quanto às resistências à compressão uniaxial e ao desgaste abrasivo (Amsler):

- A porcentagem, dimensões e distribuição do quartzo interferem na velocidade de corte e na abrasão. O “Vermelho Capão Bonito” é fortemente quartzoso (apresenta cerca de 6% a mais de quartzo que o outro granito); os cristais de quartzo formam uma verdadeira

malha/rede que envolve os cristais de feldspatos. No “Champagne Realengo”, o quartzo ocorre intersticialmente ou como cristais individualizados e com menores dimensões;

- O microfissuramento do “Vermelho Capão Bonito” é baixo e as microfissuras são mais abertas e preenchidas por filossilicatos. O microfissuramento do “Champagne Realengo” é moderado e as microfissuras apresentam certa comunicabilidade entre si;
- A alteração mineral (de origem hidrotermal) no “Champagne Realengo” é pouco superior à do “Vermelho Capão Bonito”.

Quanto à dureza Knoop e à Abrasão Profunda:

- Estas propriedades dependem da porção da rocha testada, onde o aspecto textural é determinante. O “Champagne Realengo”, pela sua homogeneidade textural, menor granulação e distribuição mais regular dos cristais de quartzo, apresentou valor pouco mais elevado de dureza Knoop. A resistência à abrasão profunda, que abrange maiores áreas da superfície da rocha, foi maior para o caso do “Vermelho Capão Bonito” (pois recebe maior influência dos cristais de quartzo).

5.4.1 – DADOS DE SERRAGEM

Foram selecionadas cargas destes materiais com as numerações: Nº 2209 para o “Champagne Realengo” e Nº 2220 (FIGURA 5.8) para o “Vermelho Capão Bonito”. Os granitos foram serrados em teares do tipo MGM/G4, dotados de dispositivos automáticos de avanço (cala) e alimentação de granalha. Os dados referentes às cargas são mostrados na TABELA 5.2.

TABELA 5.2 – Dados operacionais da serragem das cargas dos granitos estudados

Material		Champagne Realengo	Vermelho Capão Bonito
Chapas	Espessura	2cm	1,2cm
	Quantidade	64	93
	Área total	156m ²	282m ²
Dados	Cala	1,72cm/h	1,07cm/h
	Granalha	875kg	900kg
	Lâmina	435kg	600kg
		Durabilidade média: 3 a 4 serradas	
	Energia	102kw	152kw

A carga Nº 2209 é de dois blocos do “Champagne Realengo” com dimensões de 1,60m x 1,20m x 0,950m e de 1,90m x 1,40m x 1,25m em que foram gastas 221 horas para a obtenção de 64 chapas (de 2cm de espessura) correspondente a uma superfície total de 156m². O consumo foi de

cerca de 875kg de gralha (Sinto GR-03), de 435kg de lâminas chatas de aço (New Port) e de 102Kw de energia para uma velocidade de descida do quadro porta-lâminas igual a 1,72cm/hora.

FIGURA 5.8 - Blocos do Vermelho Capão Bonito (carga N° 2220) sendo serrados em tear multilâminas MGM (modelo Jumbo G4). Empresa Granitos Brasileiros (Guarulhos/SP).

A carga N° 2220 é de dois blocos do “Vermelho Capão Bonito” com dimensões de 2,40m x 1,45m x 1,20m e de 1,95m x 1,20m x 0,70m em que foram gastas 275 horas para a obtenção de 93 chapas (de 1,2cm de espessura) correspondente a uma superfície total de 282m². A serragem foi feita em um tear similar ao anterior e com a utilização de insumos dos mesmos fornecedores. O consumo foi de cerca de 900kg de gralha, de 600kg de lâmina e de 152kw de energia para uma velocidade de descida do quadro porta-lâminas igual a 1,07cm/hora.

A velocidade de corte do sienogranito “Vermelho Capão Bonito” é em torno de 62% menor que a do monzogranito “Champagne Realengo”. Esta menor velocidade para o sienogranito resulta em um acréscimo de cerca de 64 horas no processo industrial de corte blocos com altura de 1.80m.

5.4.2 – MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE DAS CHAPAS

Como critério de seleção e para tornar os valores representativos são estabelecidos os seguintes procedimentos: (1) escolha aleatória de três chapas do conjunto de cerca de 70 obtido pela serragem dos blocos de cada tipo de granito (FIGURA 5.9); (2) realização de três perfis (regiões frontal, central e de fundo) em cada uma das chapas selecionadas, conforme o exemplo da FIGURA 5.10; (3) elaboração de uma planilha específica para a anotação das informações coletadas durante os levantamentos e (4) digitação dos dados utilizando-se o *software* Excel. Para a ordenação dos arquivos adota-se o seguinte esquema: seqüência de medição / número da carga / posição da chapa / posição e identificação do perfil (por exemplo, 1_2209_e_freAB).

Em 4 etapas de campo (com duração de três dias cada), são efetuadas medições em 18 perfis de rugosidade (9 nas chapas do granito “Champagne Realengo” e 9 nas do granito “Vermelho Capão Bonito”).

FIGURA 5.9 - Visualização da carga (composta originalmente de dois blocos) do granito “Champagne Realengo”. Posição das chapas selecionadas para a medição da rugosidade superficial: (E) esquerda; (C) central e (D) direita.

FIGURA 5.10 – Detalhe da chapa E (esquerda), mostrada na foto anterior. Observar o posicionamento dos perfis de rugosidade medidos: AB e BC - perfis centrais (CEN); DE – perfil de fundo (FUN) e FG – perfil da parte frontal da chapa (FRE).

Cada perfil foi medido em pouco mais de 4 horas e contém cerca de 3700 pontos, perfazendo uma velocidade média de levantamento dos dados de rugosidade em torno de 13 pontos/minuto. Este tempo poderá ser significativamente menor se no equipamento for adaptado um motor servocontrolado (trabalhos futuros). Os valores obtidos de amplitude máxima da rugosidade (R_t) são os seguintes: “Champagne Realengo” 0,3mm e “Vermelho Capão Bonito” 0,9mm. Observa-se que:

- Por ser mais quartzoso e formado por uma malha/rede de quartzo, o “Vermelho Capão Bonito” apresentou maior rugosidade no plano de corte, decorrentes da maior dureza e da influência do quartzo no caminhar das lâminas.
- A maior valor de rugosidade (R_t) das chapas do “Vermelho Capão Bonito”, indica que nas etapas operacionais de polimento, será necessária a remoção de maior quantidade de material para se conseguir uma superfície brilhante.

Os dados estatísticos da maioria dos perfis de rugosidade são apresentados na TABELA 5.3.

A variância (ou desvio padrão) é uma medida da dispersão dos valores da variável aleatória em redor da média. Como os valores das amplitudes tendem a afastar-se da média em todos os perfis analisados, a variância é grande. Como esperado, os valores são mais expressivos nos perfis

do “Vermelho Capão Bonito”. Uma exceção é o perfil 2209_d_AB (FIGURA 5.11) associado a uma das chapas do “Champagne Realengo”. O exame prévio da chapa mostrou um defeito decorrente da alimentação excessiva de granalha durante a serragem do bloco.

TABELA 5.3 – Síntese dos dados estatísticos de perfis de rugosidade medidos pelo ARC

ROCHA	CARGA/CHAPA / PERFIL	DESVIO PADRÃO	VARIANCIA	SKEWNESS	CURTOSE
Champagne Realengo	2209_e_AB	122,54	15.016,98	-0,52	-0,54
	2209_e_DE	177,46	31.492,86	-0,29	-0,32
	2209_e_FG	182,17	33.185,90	0,27	-0,28
	2209_c_AB	216,97	47075,05	-1,34	1,94
	2209_c_DE	188,44	35510,63	-0,14	-0,28
	2209_c_FG	227,02	51537,01	-0,42	-0,86
	2209_d_AB	560,34	313976,30	0,57	-0,83
	2209_d_DE	224,01	50181,26	-0,16	-0,70
Vermelho CapãoBonito	2220_c_AB	236,56	55.960,58	0,05	0,26
	2220_c_DE	188,44	35.510,63	-0,14	-0,28
	2220_c_FG	227,02	51537,01	-0,42	-0,86
	2220_e_AB	315,12	99300,44	-0,38	-0,85
	2220_e_DE	296,71	88038,44	0,17	-0,12
	2220_e_FG	359,28	129080,26	0,20	-0,72

O estudo estatístico merece maior aprofundamento visando a representatividade das medidas realizadas pelo ARC, abrindo campo para o tratamento de dados de outros tipos de granitos.

FIGURA 5.11 – Perfil de rugosidade 2209_d_fun_AB (Champagne Realengo). Eixo das ordenadas em milímetro e eixo das abscissas em micrómetro. As expressivas diferenças de amplitudes no trecho 0-150mm são decorrentes da alimentação irregular de granalha na serragem do bloco.

5.5 – CORRELAÇÕES ENTRE RUGOSIDADE E PROPRIEDADES ÍNDICES

No sistema tribológico de serragem, além do abrasivo e tipo de rocha, as condições operacionais são fundamentais.

Para o estabelecimento de relações entre o parâmetro amplitude máxima da rugosidade (R_t) das chapas e algumas propriedades índices das rochas, sem desmerecer a operação da Granitos Brasileiros S.A., são selecionados 3 tipos de granitos beneficiados da Granitos Itabira Ltda. (TABELA 5.4), em função do melhor controle da lama abrasiva e valores de rugosidade mais precisos.

TABELA 5.4 – Sumário dos valores médios dos ensaios e da rugosidade de chapas dos granitos selecionados.

Rocha	Petrografia	R_t (mm)	RCU (Mpa)	AP (mm ³)	RDA (mm/1000m)	$HK_{média}$ (GPa)	CAD (adimensional)	Serrabilidade
Preto Indiano	Migmatito	0,30	108,71	128,3	1,07	5,66	0,74	Alta
Verde Labrador	Charnquito	0,35	183,18	92,6	0,86	6,78	0,82	Média
Vermelho Brasília	Sienogranito	0,45	209,86	120,6	0,51	6,73	0,89	Baixa

LEGENDA: R_t : amplitude máxima da rugosidade; RCU: resistência à compressão uniaxial; AP: abrasão profunda; RDA: resistência ao desgaste Amsler; $HK_{média}$ – dureza Knoop média; CAD: coeficiente de atrito dinâmico.

Nota-se que:

- Há uma tendência do aumento de R_t com a diminuição da serrabilidade;
- Há uma tendência do aumento de R_t com o aumento da resistência à compressão uniaxial. Os dados da FIGURA 5.12 indicam um coeficiente de correlação $R^2 = 0,81$;
- Há uma relação inversamente proporcional entre R_t e a resistência ao desgaste Amsler (FIGURA 5.13; $R^2 = 0,99$). Na simulação deste ensaio tem-se um sistema tribológico a três corpos (rocha, abrasivo, disco de aço) similar ao tear (rocha, granalha, lâmina), mas sem impacto da lâmina que é transmitido à rocha pela granalha;

FIGURA 5.12 – Relação entre amplitude máxima da rugosidade (Rt) e resistência à compressão uniaxial (RCU).

FIGURA 5.13 – Relação entre amplitude máxima da rugosidade (Rt) e resistência ao desgaste abrasivo (RDA).

- Embora o sistema tribológico da abrasão profunda seja também a três corpos, ele não permitiu a correlação anterior (com o desgaste abrasivo Amsler e Rt). Nos materiais

cerâmicos, a medida é feita em uma pequena área, mas que é representativa do ladrilho, visto que apresenta mesma resistência ao desgaste em toda a sua extensão. No caso de rochas, o sulco abrasivo pode não estar associado a todos os minerais da rocha, a depender de sua granulação;

- Não há uma relação direta entre R_t e a dureza Knoop média. Como na abrasão profunda, o aspecto textural da rocha é fundamental na determinação da dureza Knoop, ou seja, os resultados estão na dependência de quais porções da rocha foram testadas.

Outro enfoque da pesquisa é estabelecer relações entre a rugosidade (R_t) e o coeficiente de atrito dinâmico das rochas, visto que a medida direta da rugosidade requer amplo treinamento técnico.

Testa-se a aplicabilidade do “scivolosímetro”, que é muito mais simples, de rápida execução e não precisa de pessoal especializado. Ele é disponibilizado pela Fundação Parque de Alta Tecnologia de São Carlos (Parqtec) e nota-se que R_t e o coeficiente de atrito dinâmico (CAD) são diretamente proporcionais, ou seja, há uma tendência de aumento de R_t com o aumento do CAD (FIGURA 5.14; $R^2=0,98$).

FIGURA 5.14 – Relação entre amplitude máxima da rugosidade (R_t) e coeficiente de atrito dinâmico (CAD).

Como inconveniente, trata-se de equipamento com custo relativamente alto. Por outro lado, mostra-se muito útil para a seleção de chapas oriundas de diferentes serradas para polimento em marmorarias, podendo ser usado também para medir o coeficiente de atrito dinâmico de pisos cerâmicos e placas polidas.

6 – CONCLUSÕES

- A maior concentração de teares no Brasil se encontra no Estado do Espírito Santo, que pela sua grande diversidade de rochas ornamentais é responsável por mais da metade da produção nacional. Constitui o segundo polo mundial de desdobramento de blocos, sua importância é tão significativa que este Estado sediou, no presente ano, o I Congresso Internacional de Rochas Ornamentais.
- No processo de serragem de blocos em teares para produção de placas de rochas ornamentais quartzo-feldspáticas é sempre priorizado o avanço tecnológico de equipamentos, não sendo dada a devida importância ao material rochoso.
- No estudo da serrabilidade, a rugosidade de chapas brutas é um parâmetro fundamental e sua quantificação é possível com o equipamento “Avaliador de Rugosidade de Chapas - ARC” especialmente desenvolvido para este fim.
- A rugosidade é consequência das relações principalmente entre a rocha, a velocidade de corte e o gasto de insumos. No que diz respeito à rocha, os aspectos texturais são responsáveis pelas diferenças de rugosidade das chapas e da velocidade de serragem no sienogranito “Vermelho Capão Bonito” e no monzogranito “Champagne Realengo” (granitos de dureza mineral muito próximas).
- O acompanhamento da serragem de blocos do migmatito “Preto Indiano”, do charnoquito “Verde Labrador” e do sienogranito “Vermelho Brasília”, serrados em teares de uma empresa do sul capixaba que apresenta controle minucioso da lama abrasiva, mostra que:
 - a rugosidade das chapas (R_t) é inversamente proporcional à serrabilidade e à resistência à compressão uniaxial;

- os ensaios de dureza Knoop e de abrasão profunda não apresentam correlação direta com R_t ;
- R_t é diretamente proporcional à resistência ao desgaste abrasivo (Amsler) e ao coeficiente de atrito dinâmico, medido com scilovosímetro. No entanto, atualmente, o alto custo deste equipamento inviabiliza sua utilização para esta finalidade;

6.1 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudo comparativo da rugosidade de chapas de rochas serradas em teares de corte a seco e com fios diamantados, utilizando-se o “Avaliador de Rugosidade de Rochas – ARC”.
- Utilização do “ARC ” para outras finalidades, tais como medidas do desgaste de pisos em uso nas edificações, seleção de chapas brutas que terão menor custo de polimento e medidas do grau de empenamento de chapas de granito (problema crítico e freqüente nas serrarias). Um outro campo de aplicação é no estudo da rugosidade de capas de rolamento em pavimentos asfálticos.
- Utilização de scilovosímetro para seleção de chapas fornecidas por diferentes empresas para previsão do custo de polimento nas marmorarias .
- Uma linha de pesquisa atualmente de grande perspectiva é a serrabilidade das rochas consideradas exóticas que englobam vários tipos genéticos e que têm na comercialização um grande valor agregado.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALENCAR, C.R.A; CARANASSIOS, A.; CARVALHO, D.(1996). **Tecnologia de Lavra e Beneficiamento de Rochas Ornamentais**. Série Estudos Econômicos sobre Rochas Ornamentais. Volume 3. Fortaleza. Federação das Indústrias do Estado do Ceará. Instituto Euvaldo Lodi . 223p.
- ALMEIDA, F.F.M. *et al.* (1981). **Brazilian Structural Provinces: an Introduction**. Earth Sciences Review. N.17. p.1-29.
- ALMEIDA, F.F.M. & LETWINSKI, N. (1984). **Província Mantiqueira; Setor Setentrional**. In: ALMEIDA, F.F.M & HASUI, Y. (coord.). Pré-Cambriano no Brasil. São Paulo: Edgard Blucher. p. 282-307.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM (1969). **D2845. Standard Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock**.
- ANTOLINI, L. *et al.* (1989). **Segazione del Granito com Torbida Abrasiva: Elaborazione di Parametri Pratici com Proposte di Trattazioni Teoriche**. Cagliari. Atti Convegno Internazionale su situazione e Prospettive Dell’Industria Lapidea, p.391-402.
- ARTUR, A. C. *et al.* (2004). **Oportunidades Minerárias**. In: MELLO, I.S.C. (coord.). A Cadeia Produtiva de Rochas Ornamentais e para Revestimento no Estado de São Paulo: Diretrizes e Ações para Inovação e Competitividade. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT – Publicação 2995). Capítulo 4. p.91-114.
- ARTUR , A.C.; MEYER, A.P.; WERNICK, E.(2001). **Características Tecnológicas de Granitos Ornamentais: a Influência da Mineralogia, Textura e Estrutura da Rocha. Dados Comparativos e Implicações de Utilização**. Salvador. I Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais.p.13-19.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS – ABIROCHAS (2001). **Rochas Ornamentais no Século XXI: Bases para uma Política de Desenvolvimento Sustentado das Exportações Brasileiras**. Rio de Janeiro. CETEM/ABIROCHAS. 160p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS – ABIROCHAS (2002). **Catálogo de Rochas Ornamentais**. Rio de Janeiro: CETEM/ABIROCHAS. CD-ROM.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (1992a). **NBR 12042. Materiais Inorgânicos: Determinação do Desgaste por Abrasão**. Rio de Janeiro. 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (1992b). **NBR 12763. Rochas para Revestimento: Determinação da Resistência à Flexão**. Rio de Janeiro. 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (1992c). **NBR 12764. Rochas para Revestimento: Determinação da Resistência ao Impacto de Corpo Duro**. Rio de Janeiro. 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (1992d). **NBR 12765. Rochas para Revestimento: Determinação do Coeficiente de Dilatação Térmica Linear**. Rio de Janeiro. 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1992e). **NBR 12766. Rochas para Revestimento: Determinação da Massa Específica Seca Aparente, Porosidade Aparente e Absorção d'água Aparente**. Rio de Janeiro. 2p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1992f). **NBR 12767. Rochas para Revestimento: Determinação da Resistência à Compressão Uniaxial**. Rio de Janeiro. 2p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (1997a). **NBR 13818. Placas Cerâmicas para Revestimento – Especificação e Métodos de Ensaios. Anexo E – Determinação da Resistência à Abrasão Profunda**. Rio de Janeiro. 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (1997b). **NBR 13818. Placas Cerâmicas para Revestimento – Especificação e Métodos de Ensaios. Anexo N – Determinação do Coeficiente de Atrito**. Rio de Janeiro. 2p.
- ASSOCIAZIONE ITALIANA MARMOMACCHINE – AIM (2002). **Tecnologias Italianas para Extração e Beneficiamento de Pedras Ornamentais**. Cachoeiro de Itapemirim. Apostila. 103p.
- ATAÍDE, A. (2003). **A Serragem em Foco**. Pedras do Brasil. N° 13. p.22-26.

- AMERICAN SOCIETY FOT TESTING AND MATERIALS - ASTM (1995). **D 2845. Standard Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constant of Rocks.** 8p.
- BARBOSA, P.A.R.B. (1995). **Catálogo dos Granitos do Oeste Goiano.** Goiânia: Secretaria da Indústria, comércio e Turismo do Governo de Goiás. 28p.
- BERRY, P. *et al.* (1989). **Problemi Tecnologico nel Taglio dei Graniti.** Cagliari. Atti Convegno Internazionale su situazione e Prospettive Dell'Industria Lapidea, p.363-471.
- BERRY, P. & FABRI, S. (1992). **Parametri che Condizionano il Taglio in Lastre delle Pietre Ornamentali mediante Torbide Abrasive.** Saint Vincent. Eurocave'92. Atti I Conferenza Europea Sulle Cave. Associazione Nazionale Ingegneri Minerari. p. 228-235.
- BLASI, P. *et al.* (1995). **Pré Normativa da Medição do Polimento de Elementos de Pedra.** Lisboa. 1º Congresso Internacional da Pedra Natural. p.18-22.
- BONGIORNI, A. *et al.* (1993). **Perché?** N° 4. Marmilame. 52p.
- BRANDÃO, W., SARDDOU FILHO, R., QUEIROZ, E.T.(1991). **Mármore, Granitos e Outras Rochas Ornamentais no Brasil.** In: SCHOBENHAUS, C., QUEIROZ, E.T., COELHO, C.E.S. (edit.). Principais Depósitos Minerais do Brasil. Brasília. D.N.P.M. v. IV. Parte A. p.371-372.
- BRAUNINGER, G. & MCGOWAN, J. (1991). **La Aplicación de los Superabrasivos en lo Corte de Placas de Granito.** Roc Maquina, p. 97-110.
- BURGESS, R.R. (1989). **El Corte de Granito con Discos de Diamante.** Roc Maquina. p.22-35.
- CARANASSIOS, A. (2001). **Minerais e Rochas Industriais.** <http://www.cetem.gov.br> (01/08/2001).
- CARDU, M. *et al.* (1994). **Caratterizzazione Micromecanica delle Pietre Ornamentali.** Verona. III Congresso Italo Brasiliano di Ingegneria Mineraria. P. 286-289.
- CARDU, M. *et al.* (1995). **Stone Testing for Workability.** Lisboa. I Congresso Internacional da Pedra Natural. p. 22-30.
- CARDU, M. *et al.* (1996). **Studio per la Definizione di un Saggio Standard di Laboratorio atto alla Previsione della Segabilità delle Rocce Ornamentali con Utensili Diamantati.** Marmomacchine. N° 129. p. 192-210.

- CARDU, M. *et al.* (1997). **Caratterizzazione di una Serie Rocce Ornamentali anche ai Fini della Segabilità com Utensili Diamantati. Part I. Marmi commerciali.** Marmomacchine. Nº 134. p. 230-244.
- CARDU, M. *et al.* (1998). **Caratterizzazione di una Serie Rocce Ornamentali anche ai Fini della Segabilità com Utensili Diamantati. Part II. Graniti Commerciali.** Marmomacchine. Nº 141. p. 176-192.
- CARPINETTI, L.C.R. *et al.* (2000). **Rugosidade Superficial: Conceitos e Princípios de Medição.** Apostila. São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 51p.
- CENTRO TECNOLÓGICO DO MÁRMORE E GRANITO – CETEMAG (1995). **Arquivo Geral e Estudo do Controle de Composição de Lama.** Cachoeiro de Itapemirim. Relatório Interno.
- CENTRO TECNOLÓGICO DO MÁRMORE E GRANITO – CETEMAG (2003). **Tecnologias de Produção de Mármore e Granito.** Cachoeiro de Itapemirim. Apostila. 76p.
- CHIODI FILHO, C. (2002). **Retrospectiva das Exportações.** Pedras do Brasil. Nº 9. p.48-52.
- CHIODI FILHO, C. (2003a). **O Desempenho das Exportações Brasileiras e Capixabas em 2002.** Pedras do Brasil, Nº 14. p.52-53.
- CHIODI FILHO, C. (2003b). **Evolução Qualitativa e Quantitativa das Exportações Brasileiras de Rochas Ornamentais.** Pedras do Brasil. Nº 15. p.38-39.
- CHIODI FILHO, C. (2003c). **A Expressão Brasileira no Setor de Rochas.** Pedras do Brasil. Nº 18. p.38-41.
- CHIODI FILHO, C. (2004a). **Consumo Interno, Perfil de Utilização e Estrutura de Comercialização das Rochas no Brasil.** Pedras do Brasil. Nº 25. p.36-40.
- CHIODI FILHO, C. (2004b). **Evolução do Setor de Rochas e o Parque de Beneficiamento.** Pedras do Brasil. Nº 32. p.44-52.
- CHIODI FILHO, C. (2005). **Balanço das Exportações Brasileiras de Rochas Ornamentais e de Revestimento em 2004 – Novo Recorde Histórico de Crescimento.** Guarapari. 1º Congresso Internacional de rochas Ornamentais. (CD-ROM). 6p.
- CITRAN, G. (1988). **Considerazioni Meccaniche Energetiche Segagione.** Carrara. ANIM. II Convegno Nazionale sul Granito.
- CITRAN, G. & PORTOLANO, F. (1988). **Considerazioni Meccanico-Energetiche sulla Comminuzione e la Polverizzazione.** Torino. Congresso Internazionale di Geoingegneria.

- CITRAN, G. (1994). **Esame di Parametri Critici più/meno Noti nella Segagione di Graniti con Telai Multilame a Torbida Abrasiva e Graniglia di Acciaio**. Verona. III congresso Italo Brasiliano di Ingegneria Mineraria. p.331-334.
- CITRAN, G. (2000). **La Segagione de Graniti**. Verona: Giorgio Zusi Editore. 127p.
- CITRAN, G. (2002). **Cutting Performance with Granites using Metal Shot and Multi-blade Gangsaws**. LITOS, N° 59, p.1-7.
- CLERICI, C. & FRISA MORANDINI, A. (1985). **La Caratterizzazione Tecnica delle Rocce Ornamentali**. Bolletino della Associazione Mineraria Subalpina. N° 3-4, p. 481-501.
- COHEN, J. & MONTEIRO, C. (1991). **Durability and Integrity of Marble Cladding: “A state of the Art review”**. Journal of the performance of constructed facilities. V. 5. N.2. p.113-124.
- COIMBRA FILHO *et al.* (2004). **Estudo da Influência das Características Petrográficas nos Principais Problemas Verificados nas Etapas de Beneficiamento de Granitos Ornamentais**. 1º Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos/SP. (CD-ROM).
- COMAZZI, G.; FRISA MORANDINI, A.; TASSONE, P. (1995). **Prenormative Research on Abrasive Wear Test Methods for Stone Elements**. Lisboa. 1º Congresso Internacional da Pedra Natural.p.32-36.
- COMPANHIA BAIANA DE PESQUISA MINERAL – CBPM (2002). **Rochas Ornamentais da Bahia – Brasil**. Salvador: CBPM. CD-ROM.
- DELGADO, I.M. & PEDREIRA, A.J. (1994). **Síntese da Evolução Geológica e Metalogenética do Brasil**. Salvador: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 1v.
- EMC EDITORES ASSOCIADOS (2004). **Brazilian Exporters Catalogue of Ornamental Stones**. São Paulo: EMC Editores Associados. 153p.
- EUROPEAN COMITEE FOR STANDARDIZATION – CEN (2000) EN 12407. **Natural Stone Test Methods – Petrographic Examination**.
- FACHADA, M.C.B.S. (1999). **Influência dos Parâmetros Geotécnicos e Operacionais na Serragem Industrial de Granitos**. Lisboa. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. 84p.
- FEBOLI, W.L. (1993). **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Domingos Martins. Folha SF-24-V-A-III. Estado do Espírito Santo. Escala 1:100.000**. Brasília. DNPM/CPRM. 192p.

- FERRARINI, C.F. (1998). **Análise da Resistência ao Desgaste Abrasivo de um Revestimento Duro obtido pela Deposição, por Soldagem, de uma Liga a Base de Ferro.** São Carlos. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. 155p.
- FERREIRA, G.E. (2003). **O Setor de Rochas Ornamentais Brasileiro.** In: VILLAS BÔAS, R.C.; CALVO, B.; PEITER, C.C. (eds.). *Ibiroeka de Mámoles y Granitos. Mini-foro realizado em Salvador, BA.* Rio de Janeiro: CETEM/CYTED/CNPq. p.3-14.
- FERREIRA, J.P. (1996). **Otimização de Teares a Partir do Controle da Composição da Lama Abrasiva.** Cachoeiro de Itapemirim. Monografia. Universidade Federal do Espírito Santo. 96p.
- FINNIE, I. (1960). **Erosion of Surfaces by Solid Particles.** Wear, N° 3, p.87-103.
- FORNASERO, D.; FRISA MORANDINI, A.; MANCINI, R. (1988). **Petrografia e Durezza di Graniti come Termini di una Scala di Segabilità al Telaio.** Marmomacchine. N° 83. p.97-107.
- FRASCÁ, M.H.B.O.; MELLO, I.S.C.; QUITETE, E.B.(2000). **Rochas Ornamentais e de Revestimento do Estado de São Paulo.** São Paulo: IPT. (IPT – Publicação 2651). CD-ROM.
- FRASCÁ, M.H.B.O. & QUITETE, E.B.(2000). **Rochas Ornamentais do Estado de São Paulo – Características Tecnológicas.** Rochas de Qualidade. N°154. p.154-171.
- FRASCÁ, M.H.B.O. (2003). **Estudos Experimentais de Alteração Acelerada de Rochas Graníticas para Revestimento.** Tese de Doutorado. São Paulo. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo. 281p.
- FRAZÃO, E.B. & PARAGUASSU, A.B. (1998). **Materiais Rochosos para Construção.** In: OLIVEIRA, A.M.S.O. & BRITO, S.N.A. (eds.). *Geologia de Engenharia.* São Paulo. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia – ABGE, CNPq/FAPESP. P. 331-342.
- FRAZÃO, E.B. (1993). **Catálogo das Rochas Ornamentais do Estado do Espírito Santo.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT – Publicação 2048). 77p.
- FRISA MORANDINI, A. & GILLI, M. (1987). **Um Piano di Ricerca per l'ottimizzazione della Segazione dei Graniti al Telaio con Torbide Abrasive.** Atti Conegno Nazionale sul Granito. p. VI-XI.
- FRISA MORANDINI, A. & OGGERI, C. (1992). **Determinazione della Rugosità delle Superfici Lavorate e della Porosità in Pietre Ornamentali.** Saint Vicent. Eurocave'92. Atti 1ª Conferenza Europea sulle Cave. p.301-304.

- FRISA MORANDINI, A. & TABOADA, J. (1993). **Misura del Grado di Lucidità di Elementi Lapidari**. São Paulo. II congresso Ítalo-Brasiliiano di Ingegneria Mineraria. p.649-664.
- GLEYZES *et al.* (1998). **Roughness Measurement in the Picometric Range Using a Polarization Interferometer and a Multichannel Lockin Detection Technique**. International Journal Machine tools and Manufacture. V.38. N5/56.p.715-717.
- GONZÁLEZ-MESONES, F.L. (2005). **La Utilización de la Piedra Natural en la Arquitectura en el Marco de la Nueva Normativa Europea**. Guarapari. 1º Congresso Internacional de rochas Ornamentais. (CD-ROM).
- GRASSELLI, G. (2001). **Shear Strength of Rock Joints on Quantified Surface Description**. Tese de Doutorado. Lausanne. Ecole Polytechnique Federal de Lausanne. 124p.
- HENNIES, W.T. & STELLIN JUNIOR, A. (2000). **Contribution to the Study of Cutting Mechanism of Capão Bonito Granite, São Paulo State, Brazil**. Rotterdam. Mine Planning and Equipment Selection. p.573-576
- HILLMANN, W.; BRAND, U.; KRYSTEK, M. (1996). **Capabilities and Limitations of Interference Microscopy for Two and Three-dimensional Surface Measuring Technology**. Measurement. V.19. N.2.p.95-102.
- HOLANDA, C.J.N.; CUNHA, A.C. da; SILVA, F.A.F. (1987). **Catálogo dos Granitos de Pernambuco**. Recife: Secretaria de Indústria, Comércio e Minas do Estado de Pernambuco. 115p.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO (1995). **Règles et Procedures Pour le Mesurage de la Rugosité de Surface avec des Instruments à Palpeur**.
- KAINER, G.B.; EGOROV, A.M.; FREIDGEM, N.I. (1996). **New Method for Checking the Quality of Stone Surfaces**. Measurement techniques. V.39. N.10. p.1014-1017.
- KASCHNER, D. (1996). **Tecnologias para Beneficiamento**. In: ARAÚJO, E.S.; LACERDA FILHO, J.V., FERREIRA, M.C.B.; ARAÚJO, V.A. (orgs.). Anais do II Encontro do Centro-Oeste sobre Granitos, Mármore e Pedras Ornamentais.
- KIRAN, M.B.; RAMAMOORTHY, B.; RADHAKRISHNAN, V. (1998). **Evaluation of Surface Roughness by Vision System**. International Journal Tools Manufacture. V.38. N.5-6.p.685-690.
- KULATIKE, P.H.S.W. *et al.* (1995). **New Peak Shear Strength Criteria for Anisotropic Rock Joints**. International Journal Rock Mechanics. V.32. p.673-697.

- LANARO, F.; JING, L.; STEPHANSSON, Q. (1998). **3D Laser Measurement and Representation of Roughness of Rock Fractures**. *Mechanics of Jointed and Faulted Rock*. p.185-189.
- LAUAND, C.T. *et al.* (2000). **Rock Technological Parameters Useful to Water Jet Cutting systems**. In: 9th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, Athens, Greece. Rotterdam. Balkema. p. 625-630.
- LAUAND, C.T. *et al.* (2001). **Performance of Water Jet Cutting System in Dimension Stone**. In: 9th International conference in waterjetting. Saint Louis. EUA. p. 243-265.
- LEE, D.H. & JUANG, C.H. (1991). **A new technique for measuring the roughness profile of rock joints**. *Geotechnical Testing Journal*. V.14. N.3. p.320-322.
- LE MAITRE, R.W. (ed) (1989). **A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms: Recomendations of the International Union of Geological Sciences, Subcomission on the Systematics of Igneous Rocks**. Oxford: Blackwell Scientific Publ. 193p.
- LIMA, J. J.C. & PARAGUASSU, A.B.(2002). **Dilatação Térmica Linear de Granitos Usados em Revestimento de Edificações**. Ouro Preto. 10º CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL. p. 1-9.
- LUO, S.Y. (1997). **Investigacion of the Worn Surfaces of Diamond Sawblades in Sawing Granite**. *Journal of Materials Processing Technology*. N° 70. p.1-8.
- MANCA, P.P. (1992). **Analisi della Torbida Circolante nel Processo di Segagione del Granito**. *Quarry and Construction*. p. 53-57.
- MANCINI, R. & FRISA MORANDINI, A. (1982). **Applications of Microhardness Tests to the Technical Evaluation of Dimension Stones**. New Delhi. 4th Congress International Association of Engineering Geology. p.321-331.
- MARTÍN CORTÉS, G.R.; HENNIES, W.T.; LAUAND. C.T. (2002). **Dimensional Stone Cutting with Water Jet: Surface Finishing**. In: KEBO, V.; FARANA, R.; SMUTNY, L.; STRAKOS, V. (eds). 11th Mine Planning and Equipment Selection. Bouzov. Czech Republic. p.43-48.
- MARTÍN CORTÉS, G.R. (2003). **Métodos de Corte de Rochas com Jato de Água Abrasivo**. Tese de Doutorado. São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 132p.
- MELLO, I.S.C. (1999). **Panorama do Setor de Rochas Ornamentais do Estado de Goiás**. *Rochas de Qualidade*. V.147. p.58-67.
- MELLO, I.S.C. *et al.* (2003). **Brazilian Natural Conglomerates for Dimension Stones: Distribution – Origin – Characteristics and Uses**. In: YÜZER, E.; ERGIN, H.; TUGRUL, A.

- (Eds.) International Symposium of Industrial Minerals and Building Stones – IBMS 2003. Proceedings. Istanbul: International Association for Engineering Geology and the Environment. p.85-92.
- MELLO, J.D.B. de & TRINDADE, E.T. (1997). **Utilização da Análise Estatística da Topografia de Superfície no Estudo do Processo Abrasivo em Ensaio de Tipo de Borracha**. Goiânia. Anais do VI Encontro de Iniciação científica. p.189.
- MENDES, V.A. (2002). **Os Jazimentos de Rochas Ornamentais e sua Relação com os Eventos Tectônicos Atuantes no Território Brasileiro**. In: VIDAL, F.W.H. (ed.). Anais do III Simpósio de Rochas Ornamentais do nordeste. Recife. p.93-98.
- MENDES, V.A.; PAIVA, I.P.; SILVA FILHO, A.F. da (2002). **Condicionamento Geológico das Ocorrências de Rochas Ornamentais das Folhas Garanhuns e Belém do São Francisco. Esc.1:250.000**. In: VIDAL, F.W.H. (ed.). Anais do III Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste. Recife. p.99-112.
- MENDES, V.A. & SANTOS, C.A. dos (2003). **Jazimentos de Rochas Ornamentais da Província Borborema**. In: VIDAL, F.W.H. (ed.). Anais do IV Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste. Fortaleza. p.33-39.
- MENEGAZZO, A.P.M. (2001). **Estudo da Correlação entre a Microestrutura e as Propriedades Finais de Revestimentos Cerâmicos do Tipo Gres Porcelanato**. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Universidade de São Paulo. 250p.
- MERRIAM, R.; RIEKE, H.H.; KIM, Y.C. (1970). **Tensile Strength Related to Mineralogy and Texture of some Granitic Rocks**. Engineering Geology. V.4. p.155-160.
- METAIS DE GOIÁS – METAGO (1999). **Rochas Ornamentais de Goiás**. Portfólio. Goiânia: Laser Fotolitos.
- MONTANI, C. (2002). **Stone 2002: World Marketing Handbook**. Faenza: Gruppo Editoriale Faenza Editrice. 229p.
- MONTANI, C. (2005). **Stone 2004: World Marketing Handbook**. Faenza: Gruppo Editoriale Faenza Editrice. 245p.
- MONTANI, C. (2005). **International Stone Market. Brazil's Role and How Italian Technology has Contributed to Its Rapid Development**. Guarapari. I International Congress on Dimension Stones (CD-ROM). 4p.
- MORAES, M.C. & RODRIGUES, E.P. (1978). **Exemplo de Aplicação de Coloração Seletiva de Feldspatos Potássicos e Cálcicos, como Técnica Auxiliar no Estudo de Rochas**. Cerâmica, 24(97):32-35.

- MORAIS, J.O. (2001). **Catálogo de Rochas Ornamentais do Estado do Ceará – Brasil**. Fortaleza: Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico. CD-ROM.
- MOURA, C.L. (1998). **Estudos Geológico, Petrográfico e Tecnológico das Rochas Ornamentais da “Jazida Formoso”, Município de Formiga – MG**. Rio Claro. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista. 142p.
- MOTOKI, A.; ZUCCO, L.L.; VARGAS, T. (2003). **O Basalto da Serra Gaúcha**. Pedras do Brasil. N° 10. p.44-45.
- MUMMERY, L. (1992). **Surface Texture Analysis**. Muhlhausen: Hommelwerke, 1992. 105p.
- NAVARRO, F.C. & ARTUR, A.C. (2002). **Caracterização Petrográfica como Ferramenta para a Previsão do Comportamento Físico e Mecânico de Granitos Ornamentais: uma Discussão**. Recife. III Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste. p.2-9.
- NEGRI, J.P.G. (1997). **Correlação entre a Serrabilidade e Parâmetros Mecânicos de Resistência dos Granitos**. São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Jornada de Iniciação Científica. p.41-46.
- NEVES, A.A.A.F. (1993). **A Geomecânica do Corte de Rocha**. Dissertação de mestrado. Lisboa. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. 78p.
- NOVASKI, O. (1994). **Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica**. São Paulo. Editora Edgard Blucher. 119p.
- NÚCLEO REGIONAL DE INFORMAÇÃO TECNOLÓGICA DO ESPÍRITO SANTO – NITES (1989). **Estudo de Lama Abrasiva**. Vitória. Relatório Interno. 35p.
- NÚCLEO REGIONAL DE INFORMAÇÃO TECNOLÓGICA DO ESPÍRITO SANTO – NITES (1991). **Estudo de Lama Abrasiva**. Rochas de Qualidade. N° 107, p. 89-103.
- ONODERA, T.F.; ASOKA KUMARA, H.M. (1980). **Relation Between Texture and Mechanical Properties of Cristaline Rocks**. Bulletin International Association Engineering Geology. V.22. p.173-177.
- PARAGUASSÚ, A.B. *et al.* (2005). **Ensaio Não Rotineiros para Caracterização Tecnológica de Rochas Ornamentais**. Florianópolis. XI Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. 11p.
- PEDRAS DO BRASIL (2003). **ES Produzirá Tear a Seco**. Pedras do Brasil. N°21. p.55.

- PEDROSA, S.C.(2003). **Curso de Encarregado de Serraria**. Cachoeiro de Itapemirim. Centro Tecnológico do Mármore e Granito – CETEMAG. Apostila. 66p.
- PENHA, C.O .; MAMERI, E.A .; MACHADO, M.A . (1996). **A Lama Abrasiva e seu Controle**. Cachoeiro de Itapemirim. Monografia. Universidade Federal do Espírito Santo. 76p.
- PERFETTI, A. (1992). **Perché?** N° 3. Marmilame.59p.
- PERFETTI, A. (1996). **Perché?** N° 5. Marmilame.52p.
- PERFETTI, F.P.; MANNELLA, P.; GIANNINI, P. (1990). **Perché?** N° 1. Marmilame. 27p.
- PERFETTI, F.P.; MANNELLA, P.; GIANNINI, P. (1991). **Perché?** N° 2. Marmilame. 52p.
- PERFETTI, F.P.; MANNELLA, P.; GIANNINI, P. (1993a). **La Técnica del Aserrado de Granito con Granalla (I)**. Roc Maquina. p.57-69.
- PERFETTI, F.P.; MANNELLA, P.; GIANNINI, P. (1993b). **La Técnica del Aserrado de Granito con Granalla (II)**. Roc Maquina. p.72-94. Febrero.
- QUITETE, E. B. & RODRIGUES, E. P. (1998) - **Dureza Knoop Aplicada a Rochas Ornamentais**. Publicação IPT 2561. 4p.
- QUITETE, E.B. (2002). **Dureza Knoop em Rochas para Revestimento: Metodologia e Correlação com Desgaste Abrasivo**. São Paulo. Dissertação de Mestrado.Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 70p.
- RAJAB, A. (1998). **Catálogo de Rochas Ornamentais do Estado de Mato Grosso**. Cuiabá: Departamento Nacional de Produção mineral. 78p.
- RENGERS, N. (1970). **Influence of Surface Roughness on the Friction Properties of Rock Planes**. Congress of the International Society of Rock Mechanics. p.229-234.
- RIBEIRO, R.P.; PARAGUASSÚ, A.B.; SILVEIRA, L.L. (2004a). **Considerações sobre a Serragem de Granitos em Teares Multilâminas**. 1º Simposio Brasileiro de Jovens Geotécnicos. São Carlos. EESC/USP. (CD-ROM). 6p.

- RIBEIRO, R.P; PARAGUASSÚ, A.B.; SILVEIRA, L.L.(2004b). **Granite Sawing in Multiblade Gangsaws: a Tribological Approach**. Florence. 32nd International Geological Congress.
- RIBEIRO, R.P; PARAGUASSÚ, A.B.; RODRIGUES, J.E. (2004c). **Medidas de Rugosidade em Chapas de Granitos Ornamentais Serrados em Teares Multilâminas**. Araxá. 32º Congresso Brasileiro de Geologia.
- RIBEIRO, R.P. *et al.* (2005a). **Quantificação da Textura Superficial de Chapas de Granitos Serrados em Teares Multilâminas**. Guarapari. 1º Congresso Internacional de rochas Ornamentais. (CD-ROM). 6p.
- RIBEIRO, R.P. *et al.* (2005b). **Aplicação de Bases Conceituais de Tribologia no Beneficiamento de Granitos Ornamentais**. Revista Minerva, v.1; p.45-50.
- RIBEIRO, R.P.; PARAGUASSÚ, A.B.; RODRIGUES, J.E. (2005c). **Sawing of Blocks of Siliceous Dimension Stone: Influence of Texture and Mineralogy**. Enviado para o Bulletin of the Engineering Geology and the Environment.
- ROC MAQUINA (1998). **La Maquinaria para el Sector de la Piedra Natural**. Roc Maquina. N° 49. p.107-125.
- RODRIGUES, E.P.; COUTINHO, J.M.V.; FILHO, C.C. (1996). **Petrografia Microscópica: uma Visão do Passado, Presente e Futuro das Rochas**. Rochas de Qualidade. N°127. p.80-84.
- RODRIGUEZ-REY, A. *et al.* (1998). **El Corte de Rocas Ornamentales con Discos Diamantados: Influencia de las Características Petrográficas de la Roca**. Materiales de construcción. V.48. N° 251. p. 49-55.
- ROSSI, G.; TROIS, P.; ANDRISSI, G.S. (1997). **La Segabilità dei Graniti e Lámbiente Físico-Chimico**. Marmomacchine. N° 133. 1º bim 97. p.180-192.
- SÁNCHEZ DELGADO, N. *et al.* (2005). **The influence of Rock Microhardness on the Sawability of Pink Porrino Granite (Spain)**. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 42: 161-166.
- SCHOBENHAUS, C. *et al.* (Coord.) (1984). **Geologia do Brasil**. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral. 501p.

- SCHOUENBERG, B (2003). **Testing and Assessment of Marble and Limestone Cladding**. In: YUZER, E.; ERGIN, H.; TUGRUL, A. *Industrial Minerals and Building Stones*. Turkey: International Association for Engineering Geology and the Environment, p.187-194.
- SEKER, D.Z. & TAVIL, A.U. (1996). **Evaluation of Exterior Building Surface Roughness Degrees by Photogrammetric Methods**. *Building and Environment*. V.31. N.4. p. 393-398.
- SELONEN, O.; LUODES, H.; EHLERS, C. (2000). **Exploration for Dimensional Stone – Implications and Examples from the Precambrian of Southern Finland**. *Engineering Geology*. N°56. p.275-291.
- SIGNORELLI, N. (1993). **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Afonso Cláudio. Folha SF-24-V-A-II. Estado do Espírito Santo. Escala 1:100.000**. Brasília. DNPM/CPRM. 182p.
- SILVA, J.M. (1998). **Contribuição à Determinação da Rugosidade da Superfície de Descontinuidades Rochosas**. Dissertação de Mestrado. São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 134p.
- SILVA, J.N. (1993). **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Carta geológica, Carta Metalogenética/Previsional, escala 1:100.000, Folha SF-24-V-A-V, Cachoeiro de Itapemirim, Estado do Espírito Santo**. Brasília, Departamento Nacional de Produção Mineral / Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais.
- SILVEIRA, L.L.L. (no prelo). **Estudo Comparativo de Granitos Ornamentais Brasileiros no Processo de Polimento Industrial**. Tese de Doutorado. São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- SILVEIRA, L.L.L. *et al.* (2005). **Simulador de Polimento de Rochas – SPR**. Guarapari. 1º Congresso Internacional de rochas Ornamentais. (CD-ROM). 5p.
- SINDICATO DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS, CAL E CALCÁRIOS DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO - SINDIROCHAS (2005). **Exportações – Dados Estatísticos de Exportação**. http://www.sindirochas.com.Br/exportação_index.htm.(21/11/2005).
- SODHI, M.S. & TILIOUINE, K. (1996). **Surface Roughness Monitoring Using Computer Vision**. *International Journal Machine Tools Manufacture*. V.36. N.7. p.817-828.
- SPÍNOLA, S.V.P.A.C. (1998). **Influência da Qualidade da Serragem de Granitos no Consumo Energético do Desbaste**. Dissertação de mestrado. Lisboa. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. 138p.
- STACHOWIAK, G.W.; BATCHELOR, A.W. (1993). **Engineering Tribology**. Amsterdam, Elsevier.

- STELLIN JÚNIOR, A. (1998). **Serragem de Granitos para Fins Ornamentais**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia e Minas. São Paulo. EPUSP. 37p.
- SUÁREZ DEL RIO, L.M. *et al.* (1998). **El Corte de Rocas Ornamentales con Discos Diamantados: Influencia de los Factores Propios del Sistema de Corte**. *Materialles de Construcción*. V. 48. Nº 250. p.53-59.
- TESTING AND ASSESSMENT OF MARBLE AND LIMESTONE – TEAM (2000). **Natural Building Stone: Field Method for Measurement of Bowing of Cladding Panels**. Draft Nordtest Method. 12p.
- TESTING AND ASSESSMENT OF MARBLE AND LIMESTONE – TEAM (2004). **How to Choose, Produce and Use Marble and Limestone Cladding Panels Without the Risk of Deterioration Due to Bowing or Expansion**. 4p. <http://www.sp.se/building/team> (20/10/04).
- THOMPSON, K.R. (1990). **Cala Eletrônica Aumenta Produção**. *Rochas de Qualidade*. Nº 103. p.86-87.
- TORQUATO, J.R.; BESSA, M.F.; MUNIZ, H.F. (2002). **Uso do Pundit na Determinação de Anomalias Ultra-sônicas em Blocos Rochosos**. Recife. III Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste. p.20-23.
- TUGRUL, A. & ZARIF, I.H. (1999). **Correlation of Mineralogical and Textural Characteristics with Engineering Properties of Selected Granitic Rocks from Turkey**. *Engineering Geology*. Nº51. p.303-317.
- VIDAL, F.W.H.(2001). **Estudo do Elemento Abrasivo do Fio Diamantado na Lavra de Granitos do Estado do Ceará**. Salvador. I Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais.p.64-71.
- VIEIRA, V.S. (1997). **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Cachoeiro de Itapemirim. Folha SF.24.Z-V-A. Estado do Espírito Santo. Escala 1:250.000**. Brasília. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 110p e mapas.
- VILASCHI FILHO, A. & SABADINI, M.S. (2000). **Arranjo Produtivo de Rochas Ornamentais (Mármore e Granito) no Estado do Espírito Santo**. Nota Técnica 15. Instituto de Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – IE/UFRJ. 132p.
- ZUAZO TORRES, P. (1995). **Elaboración de Marmoles y Granitos**. In: LÓPEZ JIMENO, C. (ed.). *Manual de rocas Ornamentales: Prospección, Explotación, Elaboración e Colocación*. Madrid: Graficas Arias montano. Cap.16, p.353-397.

- ZUM-GAHR, K. H. (1987) – **Microstructure and Wear of Materials**. Institute of Materials Technology. University of Siegen, Siegen, Federal Republic of Germany, v.10.
- WILARD, R.J. & McWILLIAMS, J.R. (1969). **Microstructural Techniques in the Study of Physical Properties of Rocks**. International Journal Rock Mechanics Mining Sciences. V.6. p.1-12.
- WINKLER, H.G. (1976). **Petrogenesis of Metamorphic Rocks**. 4ed. New York: Springer-Verlag. 334p.
- WHRIGHT, D.N. & CASSAPI, V.B. (1985). **Factors Influencing Stone Sawability**. Industrial Diamond Review. N°2. p. 84-87.
- WRIGHT, D.N. & ROUSE, C. (1993). **Stone polishing – Measurement of surface finish**. Industrial Diamond Review. N°53-54. p. 10-13.
- XIE, H.; WANG, J.A.; KWASNIEWSKI, M.A. (1999). **Multifractal Characterization of Rock Fracture Surfaces**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts. V.36.p.19-27.
- WANG, W. *et al.* (1998). **A New Optical Technique for Roughness Measurement on Moving Surface**. Tribology International. V.31. N.5. p.281-287.
- WYANT, J.C. & SCHMIT, J. (1998). **Large Field of View, High Spatial Resolution, Surface Measurements**. International Journal Machine Tools Manufacture. V.38. N.5/6. p.691-698.