Isaura Clotilde Martins da Costa Regadas

**Aspectos Relacionados às Lavras de Granitos
Ornamentais com Fio Diamantado no
Norte do Estado do Espírito Santo, Brasil**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Rodrigues

São Carlos

2006

Dedico este trabalho aos meus pais que foram fundamentais na minha trajetória, sem as quais eu não teria alcançado êxito.

AGRADECIMENTOS

A Deus por estar sempre presente na minha vida.

Os meus pais, a minha irmã e sobrinho pelo amor e apoio incondicionais sobre todas as minhas decisões.

Aos meus amigos de Portugal, em especial a Carla Abreu, Cesaltina Fonseca, Maria Emília Almeida, Maria João Pinto, Jorge Ribeiro e Paula Silva pela amizade, força e incentivo o que tornou a distância um mal menor.

Ao João e Rita Merighi pelo carinho e amizade de pais que sempre tiveram para comigo e pelos conselhos nos momentos mais difíceis.

Ao Eng. José Roberto Pinheiro pela amizade e os conselhos nos momentos mais oportunos de minha pesquisa.

Ao Prof. Dr. José Eduardo Rodrigues, pela orientação e críticas que contribuíram para uma outra visão profissional.

Ao Prof. Dr. Antenor Braga Paraguassú pelo estímulo, sugestões, críticas e avaliações no decorrer do meu trabalho.

Aos professores do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos que contribuíram para o meu aperfeiçoamento profissional e elaboração deste trabalho.

A todos meus colegas pela contribuição inestimável colocada de diferentes formas para a realização deste trabalho em especial Wanessa, Clébio, Enrique, Eder, Jefferson, Sílvia, Miguel, Leonardo, Cristiane, Fagner, Osvaldo, Valeria, Lucas, Regis e tantos outros que não cito aqui.

Sou grata aos técnicos (Herivelto dos Santos, Benedito de Souza, Antonio Garcia, Décio Lourenço, Antonio Carriel, Sílvio Wick, José Luiz Guerra e Óscar Neto) e pessoal de apoio (Maristela Batissaco, Álvaro Nery e Neiva Cardoso) do Departamento de Geotecnia da

ESSC/USP, pela disponibilidade, paciência e pelo carinho que sempre demonstraram ter para comigo.

Ao Departamento de Petrologia e Metalogenia do Instituto de Geociências da Universidade Estadual Paulista (Rio Claro), ao Departamento de Rochas Ornamentais da União de ensino de São Francisco (Barra de São Francisco/ES) e a Jovanka Goulart (Fundação Parque de Alta Tecnologia / São Carlos), pelo apoio na realização de ensaios tecnológicos.

Às empresas exploradoras de granito em especial a Monte Sião Granitos, Lda, por viabilizar o acompanhamento operacional de corte nas lavras de granito.

A todas as pessoas que conheci, nesta minha passagem pelo Brasil, pelo carinho e amizade demonstrada que fez com que me sentisse em casa.

À CAPES por ter financiado parte da pesquisa.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1. Introdução.....	27
2. Estado da Arte da Extração	31
2.1 Nomenclatura das Rochas Ornamentais.....	32
2.2 Propriedades das Rochas Ornamentais.....	36
2.3 Processos de Lavra	38
2.3.1 Lavra de Rochas Ornamentais	38
2.3.2 Técnicas de Corte	39
2.4 Comparação entre Técnicas usadas em Rochas Ornamentais.....	47
2.4.1 Fio Helicoidal x Fio Diamantado	47
2.4.2 <i>Jet-Flame</i> x Fio Diamantado	48
2.4.3 Critérios de Escolha das Técnicas de Corte	49
2.5 Caracterização da Técnica de Corte com Fio Diamantado.....	52
2.5.1 Teoria do Corte com Fio diamantado	52
2.5.2 Constituintes do Fio Diamantado	56
2.5.3 Tipos de Fios Diamantados	61
2.5.4 Equipamento de corte	64
2.5.5 Ciclo operacional	67
2.5.6 Cortes Realizados com Fio Diamantado	72

2.5.7	Outras Aplicações do Fio Diamantado	78
2.5.8	Vantagens	80
3.	Materiais e Métodos.....	81
3.1	Seleção das Rochas Estudadas.....	83
3.2	Trabalho de Campo.....	86
3.2.1	Amostragem	87
3.3	Trabalhos de Laboratório	88
3.3.1	Preparação dos Corpos-de-Prova	88
3.3.2	Ensaaios de Caracterização	91
3.3.3	Captação de Imagem do Fio Diamantado	97
4.	Resultados de Laboratório	99
4.1	Ensaaios Realizados para Caracterização Tecnológica das Rochas	100
4.1.1	Análise Petrográfica	100
4.1.2	Resistência ao Desgaste Abrasivo (Método Amsler)	101
4.1.3	Abrasão Profunda	102
4.1.4	Compressão uniaxial	103
4.1.5	Velocidade de Propagação de Ondas (Vp)	105
4.1.6	Índices Físicos	106
4.2	Análise de Imagens das Pérolas Diamantadas	107
4.3	Discussão dos resultados.....	109
5.	Problemas no Processo de Corte com Fio Diamantado	111
5.1	Ângulo de Abertura.....	112
5.2	“Ovalização”	113
5.3	Execução de Emendas.....	115
5.4	“Efeito Cometa”	117

5.5	Diminuição do Espaçamento entre as Pérolas Diamantadas	119
6.	Considerações Finais	121
6.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	123
	Referências Bibliográficas.....	125

RESUMO

REGADAS, I. C. M. C. (2006). *Aspectos Relacionados às Lavras de Granitos Ornamentais com Fio Diamantado no Norte do Estado do Espírito Santo, Brasil*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 130p.

A utilização do fio diamantado na lavra de granitos ornamentais no Brasil é uma técnica de corte relativamente recente e, por esta razão, alguns problemas são decorrentes, principalmente do uso incorreto dos equipamentos, assim como também da falta de experiência dos operadores. Os casos aqui apresentados se reportam a observações em pedreiras localizadas no Estado do Espírito Santo, nas quais as imperfeições no corte se relacionam à velocidade de corte, à torção do cabo, à refrigeração do fio, à retirada antecipada das polias auxiliares e à execução inadequada das emendas. A estes fatores técnicos se somam outros, de natureza geológica, como a necessidade de melhor conhecimento das características dos maciços rochosos e da petrografia dos granitos.

Palavras-chave: rochas ornamentais; lavra granito; fio diamantado

ABSTRACT

REGADAS, I. C. M. C. (2006). *Aspects related to quarries of ornamental granites with diamond wire in the north of Espirito Santo state, Brazil*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 130p.

The use of the diamond wire in quarries of ornamental granites in Brazil is a relatively recent technique of cut and, for this reason, some problems are decurrent, mainly, of the incorrect use of the equipment, as well as of the lack of experience of operators. The cases here presented report the observations in quarries located in the State of Espirito Santo, in which the imperfections in the cut if regard the speed of cut, the twist and refrigeration of the wire and to the inadequate execution of the amendings. To these technical factors others are added, of geologic nature, like the necessity of better knowledge of the characteristics of the rocky bulks and the petrography of granites.

Keywords: ornamental rock; quarries granites; diamond wire.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Os valores mensais das exportações Brasileiras do setor de Rochas Ornamentais em 2004 – 2006 (ABIROCHAS, 2006b).	28
Figura 2.1 – Aspecto do mármore Rosa Imperial (A) e fotomicrografia (B) (MACHADO <i>et al.</i> , 2003).	32
Figura 2.2 – Aspecto do Bege Bahia (A) e fotomicrografia (B) (MACHADO <i>et al.</i> , 2003). ..	33
Figura 2.3 – Aspecto de um granito grosseiro rico em feldspato potássico (A) e fotomicrografia (B) (MACHADO <i>et al.</i> , 2003).	33
Figura 2.4 – Aspecto de um diorito fanerítico com textura granular (A) e fotomicrografia (B) (MACHADO <i>et al.</i> , 2003).	34
Figura 2.5 – Aspecto de sienito com estrutura fluidal (A) e fotomicrografia (B) (MACHADO <i>et al.</i> , 2003).	34
Figura 2.6 - Aspecto de charnoquito (A) e fotomicrografia (B) (MACHADO <i>et al.</i> , 2003). ..	35
Figura 2.7 – Aspecto de uma foliação gnáissica do tipo facoidal ou ocelar em gnaiss (A) e fotomicrografia (B) (MACHADO <i>et al.</i> , 2003).	35
Figura 2.8 – Esquema dos tipos de lavras de rochas ornamentais.	39
Figura 2.9 – Colocação de explosivos para desmembramento da prancha.	40
Figura 2.10 – Detalhe da execução da perfuração contínua.	40
Figura 2.11 - Execução da divisão mecânica por intermédio de cunhas.	41
Figura 2.12 – Aplicação de explosivos para separação de uma grande massa rochosa (Fotos cedidas pela empresa Monte Sião Granitos).	41
Figura 2.13 – Esquema ilustrativo da execução do corte com fio helicoidal (CARANASSIOS & PINHEIRO, 2004).	42

Figura 2.14 – Corte de um maciço com <i>Jet-Flame</i> : (a) início do corte e (b) corte numa fase já avançada.....	43
Figura 2.15 – A foto à esquerda é de um cortador a corrente (vídia) usado na extração de ardósia em Valongo, Portugal. À direita detalhe da corrente dentada (dentes de metal duro).44	
Figura 2.16 - A foto à esquerda é de um cortador a corrente diamantado usado na extração de ardósia em Valongo, Portugal. À direita detalhe da corrente diamantada usada.....	45
Figura 2.17 - Detalhe do corte com fio diamantado em rocha granítica.....	46
Figura 2.18 – Tipos de desgaste abrasivo (ZUM GAHR, 1987).	53
Figura 2.19 – Relação entre o tamanho do abrasivo, tipo de desgaste e rugosidade média (TOMITA & EDA, 1996).....	54
Figura 2.20 – Constituição do fio diamantado de mola com montagem simétrica (DIAMANT-BOART, 2005).....	56
Figura 2.21 – Constituição do fio diamantado vulcanizado (borracha).....	56
Figura 2.22 – Molde de injeção do revestimento no fio diamantado (STEINVARZ, 2005)...	57
Figura 2.23 – Detalhe do formato da pérola diamantada (CARANASSIOS & PINHEIRO 2004).	58
Figura 2.24 – Pérola Eletrodepositada (CARANASSIOS & PINHEIRO 2004).....	59
Figura 2.25 – Pérola Sinterizada (CARANASSIOS & PINHEIRO 2004).....	60
Figura 2.26 – Mecanismo de desgaste das pérolas sinterizadas e eletrodepositadas. Os quadrados tracejados indicam a inexistência de diamantes na pérola (CARANASSIOS & PINHEIRO 2004).....	61
Figura 2.27 – A diversidade de fios diamantados existentes no mercado. Fios vulcanizados (a), (b) e (c); fios com molas (d) e (e); fio plastificado (f).....	62
Figura 2.28 – Fio diamantado de mola com anéis de fixação.....	62
Figura 2.29 – Fio diamantado plastificado com mola e sem mola.	63

Figura 2.30 – Fio diamantado vulcanizado (sem uso).....	64
Figura 2.31 – Modelo de máquina para o acionamento do fio diamantado com regulação eletrônica (IMPrensa, 2005).	65
Figura 2.32 – Seccionamento de pranchas com fio diamantado na extração do granito Branco Ceará (PAULA, 2005).	66
Figura 2.33 – Perfuratiz realizando um furo horizontal.	68
Figura 2.34 – Introdução do fio diamantado com ajuda de um fio de nylon e ar comprimido (Foto cedida pelo Eng. José Roberto Pinheiro).	68
Figura 2.35 – Aplicação da torção no fio diamantado antes da execução da emenda (Foto cedida pelo Eng. José Roberto Pinheiro).	69
Figura 2.36 – A diversidade de tipos de uniões existentes no mercado.	69
Figura 2.37 – Antes do acionamento da máquina, o fio é puxado manualmente (Foto cedida pelo Eng. José Roberto Pinheiro).	70
Figura 2.38 – Verificação da quantidade de água usada no corte (Foto cedida pelo Eng. José Roberto Pinheiro).	70
Figura 2.39 – Checagem do diâmetro das pérolas durante o corte (Foto cedida pelo Eng. José Roberto Pinheiro).	71
Figura 2.40 – Ciclo de corte com fio diamantado.	72
Figura 2.41 - Dispositivo para início e fim de corte. (MARINI QUARRIES GROUP, 2005).	73
Figura 2.42 - Dispositivo para corte a 90° (em L).	74
Figura 2.43 - Dispositivo para corte na horizontal. (MARINI QUARRIES GROUP, 2005). .	75
Figura 2.44 – Corte de levante em “L” (Foto cedida pelo Eng. José Roberto Pinheiro).....	75
Figura 2.45 – Execução do corte “cego” (Foto cedida pelo Eng. José Roberto Pinheiro).	76

Figura 2.46 – Detalhe da introdução da haste (torre) com o fio diamantado (Foto cedida pelo Eng. José Roberto Pinheiro).....	77
Figura 2.47 – Vista geral do corte “cego” (MARINI QUARRIES GROUP, 2005).....	77
Figura 2.48 – Regularização de um bloco com fio diamantado em máquina estacionária. (DIAMANT-BOART, 2005).	78
Figura 2.49 – Fio diamantado para aplicação em multifio. Os cabos são sempre injetados de plástico transparente (DIAMANT-BOART, 2005).	79
Figura 2.50 – Corte de bloco no tear com fio diamantado (PENSEDMA, 2005).	79
Figura 2.51 – Execução de cortes em blocos de rocha por meio de desenhos que são executados através de programas computacionais (DIAMANT-BOART, 2005).	79
Figura 3.1 – Aspecto da paisagem granítica no norte de Portugal.....	82
Figura 3.2 – Pedreira da empresa Pedra Nossa em Pedras Salgadas, Portugal.....	82
Figura 3.3 – Mapa do Estado do Espírito Santo com destaque para o município de Barra de São Francisco.	85
Figura 3.4 – Vista das pedreiras onde se extrai o “granito” Ouro Brasil. O maciço rochoso é explorado por quatro empresas.	86
Figura 3.5 – Vista da pedreira onde se extrai o “granito” <i>Desert Storm</i>	87
Figura 3.6 – Redução das dimensões da amostra do “granito” Ouro Brasil para transporte ao laboratório.	87
Figura 3.7 – Detalhe do: (a) corpo-de-prova extraído; (b) produto final - ladrilho. Notar em tracejado vermelho a ocorrência da estrutura foliada.	88
Figura 3.8 – Exemplo de uma placa obtida para o “granito” <i>Desert Storm</i>	89
Figura 3.9 – Detalhe dos corpos-de-prova extraídos do “granito” <i>Desert Storm</i> (a) planos perpendiculares; (b) planos paralelos e (c) planos oblíquos (aproximadamente de 45 graus).	89

Figura 3.10 – Extração dos corpos-de-prova com coroa diamantada ($\phi = 7,5$ cm) do “granito” Ouro Brasil.	90
Figura 3.11 – Redução dos corpos-de-prova cilíndricos para as dimensões especificadas nos ensaios de compressão.	90
Figura 3.12 – Retífica automática com rebolo diamantado em operação nos corpos-de-prova do “granito” Ouro Brasil.	91
Figura 3.13 – Aparelho utilizado para a determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas num corpo-de-prova (A) cilíndrico do “granito” <i>Desert Storm</i> preparado para o ensaio de compressão uniaxial.	94
Figura 3.14 (a) Ensaio de abrasão profunda no “granito” <i>Desert Storm</i> . (b) Abrasímetro.	96
Figura 3.15 – Captação de imagem de uma pérola diamantada (A) com a lupa digital utilizada na pesquisa.	97
Figura 4.1 – Amostra de um ladrilho do “granito” <i>Desert Storm</i>	100
Figura 4.2 – Amostra de um ladrilho do “granito” Ouro Brasil.	101
Figura 4.3 Amostra do “granito” Ouro Brasil após o ensaio onde 1 e 2 representam as duas cavidades deixadas pelo desgaste do disco.	103
Figura 4.4 – Pérola diamantada onde é possível observar as arestas dos diamantes assim como o aparecimento de novos diamantes.	107
Figura 4.5 – Pérola na sua fase final de utilização com um desgaste uniforme.	108
Figura 4.6 - Pérola na sua fase final de utilização com um desgaste irregular.	108
Figura 5.1 – Esquema elucidativo de um corte em rocha granítica, onde é indicado o ângulo de abertura.	112
Figura 5.2 – Duas situações diferentes de corte vertical: (a) a polia foi retirada antes do término do corte, (b) a polia se manteve até ao fim do corte. A linha tracejada indica as feições deixadas pelo fio diamantado.	113

Figura 5.3– Aspecto de um fio diamantado com feições de “ovalização”. Notar o detalhe do desgaste diferencial da pérola e a exposição do cabo de aço (B).	114
Figura 5.4 – Fio diamantado desgastado homogeneamente, sem feições de ovalização, retirado da pedreira que explora o “ <i>Desert Storm</i> ”.	114
Figura 5.5 – Controle do desgaste do fio no decorrer de um corte vertical.	115
Figura 5.6 – Execução de emenda num fio diamantado.	116
Figura 5.7 – Exemplos de emendas realizadas em fios diamantados.	117
Figura 5.8 – Ampliação de 50 x de uma pérola que apresenta efeito cometa. Fio utilizado numa pedreira do granito “Ouro Brasil”.	118
Figura 5.9 – Seta indicativa do sentido de corte.	119
Figura 5.10 – (a) efeito “churrasquinho” num trecho de um fio diamantado. (b) ampliação do efeito em 3 x.	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Normalização usada para Rochas Ornamentais segundo a EN, NBR e ASTM. .	37
Tabela 2.2 – Confronto entre os parâmetros das tecnologias de fios diamantado e helicoidal em rochas carbonáticas (ALENCAR <i>et al.</i> , 1996).	48
Tabela 2.3– Parâmetros técnicos entre o corte com o fio diamantado e <i>Jet-Flame</i> em rocha granítica (ALENCAR <i>et al.</i> , 1996).....	49
Tabela 2.4 – Comparação técnico-econômica das tecnologias existentes para a lavra de mármore (BORTOLUSSI <i>et al.</i> , 1988 <i>Apud</i> VIDAL, 1999, p.85).	50
Tabela 2.5 – Comparação técnico-econômica das tecnologias existentes para a lavra de granito (BORTOLUSSI <i>et al.</i> , 1988 <i>Apud</i> VIDAL, 1999, p.86).....	51
Tabela 3.1 – Produção de rochas por regiões e estados brasileiros (CHIODI FILHO, 2004) .	84
Tabela 4.1 Resultados dos ensaios de resistência ao desgaste abrasivo (Método Amsler). ..	102
Tabela 4.2 – Resultados do ensaio de abrasão profunda.	103
Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de compressão Uniaxial.	104
Tabela 4.4 - Resultados da determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas.	105
Tabela 4.5 Resultados obtidos de índices físicos	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIROCHAS – Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológica do Estado de São Paulo.

ASTM – American Society for Testing and Materials.

ISRM – International Society for Rock Mechanics.

EN – European Standard

1 INTRODUÇÃO

O setor de rochas ornamentais tem se tornado, ano após ano, um fator cada vez mais preponderante na economia de diversos países. No que diz respeito ao Brasil, a produção de rochas ornamentais cresce a cada ano e teve em 2005 um aumento nas exportações da ordem de 31,45%, o que representa um montante de aproximadamente US\$ 790 Milhões (ABIROCHAS, 2006a). Na figura 1.1 pode se observar que no primeiro quadrimestre de 2006, o faturamento das exportações teve um acréscimo de 32,84% em relação ao mesmo período de 2005 (ABIROCHAS, 2006b). Há que se denotar ainda que o setor vem apresentando, cada vez mais, a contribuição dos produtos semi-acabados e acabados, o que significa maior valor agregado no total das transações comerciais.

Figura 1.1 – Os valores mensais das exportações Brasileiras do setor de Rochas Ornamentais em 2004 – 2006 (ABIROCHAS, 2006b).

O acréscimo das exportações requer a necessidade de aperfeiçoar os métodos com tecnologias avançadas, para aumentar a produtividade e a qualidade do produto. Em vista disso, tem se registrado uma sucessiva melhoria, em particular das técnicas de corte, dentre elas o aprimoramento do fio diamantado. Porém o ganho tecnológico incorporado nos insumos e nas máquinas, em certos aspectos, não refletiram no ganho de qualidade do corte.

A indústria da pedra é influenciada de forma marcante pelos países mais desenvolvidos que, além de terem tradição no setor, apresentam o domínio das técnicas de extração, beneficiamento e produção de equipamentos. Apesar disso, o Brasil tem apresentado uma significativa melhoria em alguns aspectos como por exemplo a produção de equipamentos utilizados neste setor, contudo ainda não despontou para a importância de desenvolver pesquisas, de uma forma mais intensa.

Com a crescente utilização da técnica de fio diamantado, as pedreiras de granitos ornamentais têm apresentado um aumento significativo na extração de blocos, devido a um conjunto de resultados positivos a ela relacionados, a saber: aumento da produtividade,

diminuição da intensidade de ruído e de vibrações, além da diminuição na geração de resíduos finos (pó de rocha). A consequência da somatória destes resultados resulta na significativa melhoria do produto final. Independentemente destes aspectos auspiciosos, nem todas as empresas tem condições financeiras para a aquisição dos equipamentos e insumos. O corte de granitos com fios diamantados pode apresentar alguns problemas, geralmente decorrentes de sua utilização incorreta. A execução do corte pode imprimir diversos efeitos no fio, os quais, por sua vez, refletem as condições operacionais da lavra. Estas feições são passíveis de uma posterior análise, objetivando a identificação de eventuais circunstâncias inadequadas de utilização desta técnica de lavra.

As propriedades relacionadas ao material pétreo em combinação com as variáveis do processo de corte com fio diamantado não estão devidamente esclarecidas, sendo que um estudo integrado entre estes três grupos de variáveis, rocha, máquina e fio, propiciará um entendimento mais amplo do processo.

O trabalho foi realizado em pedreiras do Estado do Espírito Santo e pretende dar ênfase ao estudo dos procedimentos do ciclo operacional, visando otimizar o processo de corte. O plano inicial tinha como objetivo estudar o ciclo operacional fixando algumas variáveis para os cortes nas lavras de estudo, como a máquina de corte, o fio diamantado e as condições operacionais. Porém todo o trabalho que envolve a universidade e o setor da indústria acarreta um conjunto de situações inesperadas, onde as condições são alteradas e estabelecidas em função de interesses da empresa. Além disso tem outras questões como a variação do dólar, que levam a empresa a mudar de estratégia, exemplo deste fato foi a troca de fio diamantado vulcanizado para fio plastificado. Desta forma não foi possível executar o planejado na íntegra. Recolheu-se o maior número de informações possíveis o que permitiu relacionar os principais problemas detectados no fio diamantado, referentes às condições operacionais e geológicas (fraturas e heterogeneidades), como por exemplo: a proeminência

dos diamantes, o desgaste diferencial das pérolas diamantadas (ovalização), a contaminação com posterior ruptura do cabo de aço e a diminuição do espaçamento entre pérolas.

A presente pesquisa foi dividida em seis capítulos. Inicia com uma abordagem sobre o estado da arte da extração no CAPÍTULO 2 onde é feita a descrição dos processos de lavra bem como as tecnologias usadas para rochas ornamentais, destacando o fio diamantado que é uma técnica relativamente recente e em fase de aperfeiçoamento.

No CAPÍTULO 3 são apresentados a localização das lavras e os tipos de granitos que permitiram efetuar este estudo, assim como a metodologia adotada.

Os resultados dos ensaios de caracterização tecnológica e da captação de imagem das pérolas diamantadas mais relevantes para este trabalho são apresentados no CAPÍTULO 4.

No CAPÍTULO 5 são descritos os problemas detectados em lavras de granito usando a técnica de fio diamantado.

As considerações finais são apresentadas no CAPÍTULO 6 juntamente com sugestões para trabalhos futuros.

2 ESTADO DA ARTE DA EXTRAÇÃO

Em tempos primórdios, os blocos de mármore eram extraídos por meio da introdução de cunhas de madeira nas fissuras naturais do corpo rochoso. Essas cunhas eram encharcadas com água que, dilatando-se, dividiam a pedra. Com o advento dos explosivos, começou a sua utilização pela introdução nos orifícios das falhas e fraturas do maciço, visando à obtenção de blocos (STELLIN & CARANASSIOS, 1991).

Segundo CAPUZZI (1988) no início do século XX, a Itália passou a usar o fio helicoidal como tecnologia de lavra para corte dos blocos de mármore e a partir de 1977 introduziu, na região de Carrara, a tecnologia do cortador a corrente e do fio diamantado. No intervalo de 10 anos registrou-se uma rápida evolução, e no final da década 80 foi introduzida a tecnologia do fio diamantado para granitos, na região da Sardenha, Itália, que hoje é um importante centro desta técnica.

CICCU (1989) alerta que o conhecimento prévio das características de uma determinada formação rochosa representa condição indispensável para a correta escolha da metodologia de lavra e da programação racional a ser adotada, com a finalidade de obter o melhor desempenho da atividade produtiva.

2.1 NOMENCLATURA DAS ROCHAS ORNAMENTAIS.

Considera-se como rocha ornamental a que é produzida pela extração em forma de blocos e que é, na maioria dos casos, serrada em placas, visando aplicações na construção civil, decorações e urbanismo (ALMEIDA & CHAVES, 2002).

Comercialmente as rochas ornamentais são classificadas em dois grupos: mármore e granitos. Os mármore ornamentais são rochas carbonatadas em geral como os mármore (*strictu sensu*), os travertinos e os calcários. Já o grupo dos granitos ornamentais engloba rochas ígneas ou metamórficas silicatadas, como por exemplo, granito (*strictu sensu*), charnoquito, sienito, gabro, diorito, basalto, gnaiss, entre outros. Observa-se que esta classificação não segue um critério petrográfico e que a diferença principal entre os dois grupos se relaciona a “dureza” das rochas. Segue-se uma sucinta descrição litológica de algumas rochas ornamentais, cujas conceituações estão de acordo com a norma NBR 15012, FRASCÁ & SARTORI (1998), FRAZÃO (2002) e MACHADO *et al.*, (2003).

Mármore - Rocha constituída por mais de 50% de minerais de carbonáticos. Apresenta estrutura maciça e granulação variada. Alguns exemplos de mármore ornamentais são o Rosa Imperial (Figura 2.1), Branco Paraná, Branco Clássico e Branco Italva.

Figura 2.1 – Aspecto do mármore Rosa Imperial (A) e fotomicrografia (B) (MACHADO *et al.*, 2003).

Calcário – Rocha sedimentar formada por processos químicos/ bioquímicos. Também originada por fragmentos ou grãos carbonáticos mecanicamente transportados e depositados. Exemplos deste tipo de rocha são o *Mont Charmot* e o Bege Samarino.

Travertino – É uma variedade de rocha calcária, de cor bege e estrutura maciça, formada pela precipitação química. O principal exemplo deste tipo de rocha é o Bege Bahia (Figura 2.2).

Figura 2.2 – Aspecto do Bege Bahia (A) e fotomicrografia (B) (MACHADO *et al.*, 2003).

Granito - Rocha plutônica, composta essencialmente por quartzo, feldspato potássico (ortoclásio ou microclínio), plagioclásio, aos quais, frequentemente, associam-se, em quantidades bem menores, micas, como a biotita ou a muscovita (Figura 2.3). A estrutura é usualmente maciça, mas pode exibir certa orientação marcada pela isorientação de feldspatos. O Vermelho Brasília, Capão Bonito, Rosa Iracema são exemplos de granitos ornamentais.

Figura 2.3 – Aspecto de um granito grosseiro rico em feldspato potássico (A) e fotomicrografia (B) (MACHADO *et al.*, 2003).

Diorito - Rocha ígnea hipoabissal com quartzo ausente ou subordinado. Ocorrem como pequenos corpos associados a suítes graníticas em cinturões orogénicos. Apresenta como componentes essenciais plagioclásio Na-Ca (oligoclásio a andesina), feldspato potássico subordinado e minerais ferromagnesianos (piroxênio, anfibólio e biotita) (Figura 2.4). Os dioritos mais comercializados como rochas ornamentais são o Preto São Gabriel e o Preto São Domingos.

Figura 2.4 – Aspecto de um diorito fanerítico com textura granular (A) e fotomicrografia (B) (MACHADO *et al.*, 2003).

Sienito - Rocha ígnea plutónica também denominada por rocha alcalina, composta por feldspato potássico ou feldspatóides, com proporções variadas de minerais ferromagnesianos com ausência ou presença subordinada (<5%) de quartzo (Figura 2.5).

Os sienitos são rochas que tem um alto valor no mercado das rochas ornamentais, sendo alguns exemplos o Ás de Paus, Marrom Café e Azul Bahia.

Figura 2.5 – Aspecto de sienito com estrutura fluidal (A) e fotomicrografia (B) (MACHADO *et al.*, 2003).

Charnoquito – É um grupo especial de rochas plutônicas. Tem uma textura média a grossa, geralmente de coloração esverdeada, composta basicamente por feldspato plagioclásio, piroxênio e anfibólio com pouco quartzo (Figura 2.6). Exemplos desta rocha são o Verde Pavão, Verde Ubatuba e Verde Butterfly.

Figura 2.6 - Aspecto de charnoquito (A) e fotomicrografia (B) (MACHADO *et al.*, 2003).

Gnaisses – Rochas geradas a partir de protólitos, ricos em quartzo e feldspato, através de processos metamórficos. Os minerais encontram-se todos recrystalizados e dispostos segundo faixas mais ou menos paralelas, formando bandas alternadas, claras e escuras. Em regra geral, os grãos apresentam uma forma arredondada ou lenticular (Figura 2.7).

Alguns dos gnaisses mais comercializados como rochas ornamentais são: Pedra Madeira, Floral Pádua Prata e Pedra Paduana Prata.

Figura 2.7 – Aspecto de uma foliação gnáissica do tipo facoidal ou ocelar em gnaiss (A) e fotomicrografia (B) (MACHADO *et al.*, 2003).

Quartzitos - são rochas formadas quase que exclusivamente de quartzo recrystalizado, em arranjos granoblásticos. Têm cor branca, com variações para vermelho ou tons

amarelados, muito utilizados como rocha ornamental, como o Azul Imperial, o *Louise Blue* e o Azul Macaúbas.

A designação “Rocha de Revestimento” é normalmente usada para rochas que não sofrem processo industrial de beneficiamento. As ardósias, quartzitos foliados e pedras de cantaria são exemplos deste grupo.

2.2 PROPRIEDADES DAS ROCHAS ORNAMENTAIS

A crescente utilização de rochas ornamentais e de revestimento no cenário mundial, e sobretudo de granitos no Brasil ao longo dos últimos anos (ABIROCHAS, 2001), tem diversificado as situações de uso e consequentemente acarretado maior probabilidade de ocorrência de patologias devido ao emprego inadequado da rocha.

As características tecnológicas das rochas para fins ornamentais podem ser determinadas através da execução de ensaios onde são conhecidas as peculiaridades desses materiais. No Brasil, as normas existentes são baseadas nas normas americanas, principalmente as da ASTM (*American Standard of Testing and Materials*). Todavia, as normas européias (EN) tendem cada vez mais a ser a referência mais aceita, por serem as mais completas e pelas exigências do mercado internacional. Algumas normas já existentes e padronizadas pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) indicam valores padrão para alguns ensaios e também existem algumas sugestões do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo).

A caracterização tecnológica deve ser realizada logo na etapa da pesquisa mineral. Existe uma diversidade de ensaios que podem ser feitos, dependendo da finalidade e da utilização que se pretende dar à determinada rocha.

Na tabela 2.1 são apresentados os ensaios de caracterização tecnológica segundo as normas européias (EN), brasileiras (NBR) e americanas (ASTM) para as rochas ornamentais.

Tabela 2.1 – Normalização usada para Rochas Ornamentais segundo a EN, NBR e ASTM.

Ensaio	EN	NBR	ASTM
Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade.	1925	x	x
Determinação da resistência à compressão uniaxial.	1926	12767	D - 2938 C - 170
Determinação da densidade real e aparente e da porosidade total e aberta.	1936	12766	C - 97
Determinação da resistência à cristalização de sais.	12370	x	x
Determinação da resistência ao congelamento.	12371	12769	x
Determinação da resistência à flexão sobre carga concentrada.	12372	12763	C - 99
Análise petrográfica.	12407	12768	C - 295
Determinação da resistência à flexão sobre momento constante	13161	12763	C - 880
Determinação das características geométricas dos produtos de rocha natural.	13373	x	x
Determinação da absorção de água sobre pressão atmosférica.	13755	x	x
Determinação da resistência à ação de SO ₂ na presença de umidade.	13919	x	x
Determinação da resistência a ação de choque térmico.	14066	x	x
Determinação do módulo de elasticidade dinâmico.	14146	x	x
Determinação da resistência à ação de névoa salina.	14147	x	x
Determinação da resistência à abrasão.	14157	12042	C - 241
Determinação da energia de ruptura.	14158	12764	C - 170
Determinação da dureza Knoop.	14205	x	x
Determinação da resistência ao escorregamento pelo teste do pendulo.	14231	x	x
Determinação da velocidade de propagação de ondas.	14579	x	D - 2845
Determinação do módulo de elasticidade estática	14580	10341	D - 3148
Determinação do coeficiente de expansão térmica linear.	14581	12765	E - 228

2.3 PROCESSOS DE LAVRA

As explorações das jazidas de rochas ornamentais são realizadas através da combinação das diversas técnicas disponíveis, com o intuito de otimizar os ciclos produtivos, e os resultados econômicos e financeiros.

Na presente pesquisa, foi feito um levantamento da escassa bibliografia sobre o tema, entretanto prevaleceu um apanhado fundamentado em compilações de ALENCAR *et al.* (1996), na tese de doutorado de CARANASSIOS (1993) e na apostila deste mesmo autor, elaborada para curso de operador de fio diamantado (CARANASSIOS & PINHEIRO, 2004).

Os aspectos geológicos e estruturais da jazida, assim como as características e o valor do material a ser lavrado, normalmente apresentam variações que são determinantes para a escolha da tecnologia adequada.

2.3.1 LAVRA DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Os métodos de lavra definem a seqüência espacial e temporal de operações e ciclos de trabalho para o aproveitamento de uma jazida. A escolha do tipo de lavra é função da morfologia dos afloramentos, do volume da reserva, do seu estado de fraturamento, da localização geográfica da área e das características intrínsecas do material objeto da exploração.

A figura 2.8 representa, de forma esquemática, os tipos de lavas usados para rochas ornamentais.

Figura 2.8 – Esquema dos tipos de lavras de rochas ornamentais.

2.3.2 TÉCNICAS DE CORTE

O desenvolvimento tecnológico do setor aprimorou as alternativas operacionais dos métodos de lavra, permitindo que estes fossem otimizados.

As tecnologias denominadas tradicionais, podem ser divididas em dois grupos principais: as cíclicas e as de corte contínuo, incluindo neste segundo grupo as tecnologias modernas de corte.

2.3.2.1 CÍCLICAS

Os cortes necessários para isolar um volume de rocha são realizados através da sucessão de diversas operações, algumas parcialmente ou totalmente sobrepostas, que vão constituir as fases de um ciclo. Estas tecnologias baseiam-se, principalmente, na técnica de perfuração, e são caracterizadas por uma grande versatilidade e poder de adaptação em situações de atividades extrativas.

2.3.2.1.1 CORTE POR MEIO DE PERFURAÇÃO E EXPLOSIVOS

É baseado na utilização de explosivos carregados em furos dispostos próximos entre si e que definem um plano de corte. Esses furos são carregados, com explosivos dosados com uma carga extremamente baixa, destinada a provocar a ruptura da rocha somente entre os furos (Figura 2.13). Devido a sua versatilidade, facilidade de execução, condições favoráveis da rocha e custos normalmente inferiores, suplantam as técnicas alternativas para o caso de pedreiras cuja produção varia de média a baixa (COELHO & VIDAL, 2003).

Figura 2.9 – Colocação de explosivos para desmembramento da prancha.

2.3.2.1.2 PERFURAÇÃO CONTÍNUA

Consiste na execução de furos justapostos de modo que se obtenha um plano de ruptura contínuo ou intercalado por diafragmas suficientemente sutis que permitam sua completa separação. Realiza-se inicialmente uma série de furos de 2,5” (0,051 m) de diâmetro, posteriormente serão feitos furos de 3,0” (0,076 m) de diâmetro intercalados com os furos anteriores (Figura 2.14).

Figura 2.10 – Detalhe da execução da perfuração contínua.

2.3.2.1.3 DIVISÃO MECÂNICA POR MEIO DE CUNHAS

Baseia-se no uso da perfuração e constitui uma das técnicas mais amplamente adotadas (Figura 2.15). Utiliza os dispositivos com cunhas, responsáveis pelas operações de subdivisão da rocha de acordo com planos pré estabelecidos, geralmente aqueles preferenciais de orientação mineral.

Figura 2.11 - Execução da divisão mecânica por intermédio de cunhas.

2.3.2.1.4 DIVISÃO POR INTERMÉDIO DE AGENTES EXPLOSIVOS

É utilizada, na maioria dos casos, diretamente sobre os blocos ou na separação de grandes massas rochosas, como por exemplo, pranchas com volumes consideráveis (Figura 2.16).

Figura 2.12 – Aplicação de explosivos para separação de uma grande massa rochosa (Fotos cedidas pela empresa Monte Sião Granitos).

2.3.2.2 CORTE CONTÍNUO

As tecnologias de corte contínuo constituem-se basicamente operações efetuadas sem o uso predominante da perfuração e explosivo, principalmente na lavra de rochas de origem carbonatadas (mármore).

2.3.2.2.1 FIO HELICOIDAL

O fio helicoidal é composto de 3 cabos de aço torcidos em forma de hélice que corre por cima de roldanas em circuito fechado, tensionado contra a superfície rochosa a ser cortada. O fio arrasta material abrasivo, como quartzo, utilizado para calcários, ou esmeril para rochas silicáticas. O sentido do retorcimento é invertido a cada 30 m de cabo. O comprimento do fio pode variar de 500 m a 3.000 m (Figura 2.17). A técnica está hoje caindo em desuso e sendo substituída pelo fio diamantado.

Figura 2.13 – Esquema ilustrativo da execução do corte com fio helicoidal (CARANASSIOS & PINHEIRO, 2004).

2.3.2.2 *JET-FLAME* (MAÇARICO)

De acordo com PEREIRA *et al.* (1997) e BORTOLUSSI *et al.*, (1989), o uso do *Jet-Flame* destina-se particularmente às rochas silicatadas e preferencialmente homogêneas. O corte é realizado através de uma lança contendo na sua extremidade um maçarico que provoca uma chama de temperatura na ordem de 1.500°C , o que gera dilatação diferencial dos minerais (principalmente quartzo) que vão se soltando e são “soprados” sob forma de areia. A faixa ideal para se trabalhar com este equipamento é de uma fenda de 0,10 m a 0,20 m de largura e de até 6 m de profundidade (Figura 2.18).

É utilizado para solucionar o problema da abertura de canais e rebaixos onde a falta de superfícies livres inviabiliza o uso de explosivos. Observe-se que o *Jet-Flame* é utilizado apenas para rochas graníticas, pois é limitado às rochas com quartzo.

(a)

(b)

Figura 2.14 – Corte de um maciço com *Jet-Flame*: (a) início do corte e (b) corte numa fase já avançada.

2.3.2.2.3 CORTADOR A CORRENTE

O cortador a corrente é constituído essencialmente por um “braço” sobre o qual desliza uma corrente dentada que gira na periferia do mesmo e direcciona o corte. Para as rochas menos tenazes utilizam-se dentes de metal duro (vídia) (Figura 2.19). O comprimento do “braço” representa uma limitação quanto à altura ou profundidade de corte e sua aplicação é indicada para jazidas cujo nível de fratura é baixo, de modo a não prejudicar o rendimento das bancadas isoladas.

Figura 2.15 – A foto à esquerda é de um cortador a corrente (vídia) usado na extração de ardósia em Valongo, Portugal. À direita detalhe da corrente dentada (dentes de metal duro).

2.3.2.3 MODERNAS TÉCNICAS DE CORTE

Segundo CICCUC (1989), as novas tecnologias de corte introduzidas, em nível industrial, nas pedreiras são as baseadas no uso de elementos diamantados (fio e correntes diamantadas) e aquelas que utilizam jatos d’água a grande velocidade (sem ou com abrasivos).

2.3.2.3.1 CORTADOR A CORRENTE DIAMANTADA

O cortador a corrente diamantada tem um mecanismo semelhante ao já citado, porém com a diferença de que os dentes de metal são substituídos por peças diamantadas (Figura 2.20). Na maioria dos casos, a técnica representa um recurso integrado ou de preparação para uso de outras técnicas, como por exemplo, fio diamantado. A principal vantagem do cortador a corrente diamantada reside no fato de se obter uma superfície de corte perfeita, não necessitando, desde o início até o final do corte, da execução de trabalhos preparatórios.

Figura 2.16 - A foto à esquerda é de um cortador a corrente diamantado usado na extração de ardósia em Valongo, Portugal. À direita detalhe da corrente diamantada usada.

2.3.2.3.2 FIO DIAMANTADO

A técnica mais usada atualmente, o fio diamantado, é composto por um cabo de aço inox de tipo flexível, formado de fios torcidos, com diâmetro interno de 5mm, sobre o qual são colocadas pérolas diamantadas, de 11mm de diâmetro, separadas por anéis de borracha e/ou molas espaçadoras (DIAMANT – BOART, 2005). O fio diamantado pode ser utilizado em cortes verticais e horizontais em bancada ou no esquadrejamento após desmonte (Figura 2.21).

Duas grandezas caracterizam a performance do fio diamantado: a velocidade de corte e a durabilidade do cabo. Para uma determinada rocha o rendimento do corte varia com a velocidade e com a tensão aplicada ao fio e, portanto, com a potência aplicada.

Figura 2.17 - Detalhe do corte com fio diamantado em rocha granítica.

2.3.2.3.3 JATO DE ÁGUA (*WATERJET*)

Na técnica de *WaterJet* o corte é realizado por um ou mais jatos de água, gerados a alta pressão, que podem atingir a casa dos 400 MPa. Realizados a uma distância próxima da rocha, provocam o desprendimento dos fragmentos junto às microdescontinuidades mineralógicas, onde a ação encontra sua maior eficiência.

Esta técnica encontra-se em fase de desenvolvimento para aplicação nas pedreiras de rochas ornamentais. Assim sendo pode ser aplicada satisfatoriamente nos materiais que possuem granulometria cristalina bem definida e também naqueles que apresentam micro descontinuidades, como granitos e arenitos, por exemplo.

As superfícies de corte produzidas são rugosas, mas de maneira geral regulares. A espessura de corte é da ordem de 20mm a 50mm, variando de acordo com o tipo de rocha, dos parâmetros de regulação do sistema (vazão e pressão) e do modelo de bico e de haste adotados.

2.4 COMPARAÇÃO ENTRE TÉCNICAS USADAS EM ROCHAS ORNAMENTAIS

Com a crescente evolução dos equipamentos e o aparecimento do fio diamantado algumas técnicas de lavra têm caído em desuso. Anteriormente, cada grupo de rocha tinha uma técnica de corte mais adequada. Em mármore, até então, era usado o fio helicoidal e em granitos a preferência era pelo *Jet-Flame*. A utilização do fio diamantado na exploração de rochas ornamentais veio trazer diversos benefícios para os dois tipos de rocha. Segue-se uma comparação das vantagens do fio diamantado em relação às duas principais técnicas até então usadas.

2.4.1 FIO HELICOIDAL X FIO DIAMANTADO

Com o advento do fio diamantado para o corte de rochas graníticas, o emprego do fio helicoidal tem encontrado limitações quanto ao seu uso em virtude do elevado custo do abrasivo, da relativa lentidão do corte e em particular, no que se refere à distribuição regular do abrasivo ao longo do perfil inferior. Além disso, as operações que constituem as etapas de corte são de difícil mecanização e diretamente agravadas pelo elevado custo de mão-de-obra. Para cada superfície a ser cortada, são necessários em média cinco operários para inspeção e o controle da operação.

Foi feito um estudo com a finalidade de comparar o rendimento de uma lavra de rocha carbonática com fio diamantado e outra com fio helicoidal. A Tabela 2.1 apresenta os valores encontrados.

Tabela 2.2 – Confronto entre os parâmetros das tecnologias de fios diamantado e helicoidal em rochas carbonáticas (ALENCAR *et al.*, 1996).

MODALIDADE OPERACIONAL E PRESTAÇÃO	PARÂMETROS	
	Fio Diamantado	Fio Helicoidal
Velocidade do fio (m/s)	20 - 40	6 - 18
Potência instalada (KW)	15 - 60	10 - 40
Comprimento do fio (m)	40 - 80	1000 - 4000
Diâmetro do fio (mm)	10	3,5 – 5,0
Velocidade de corte (m ² /h)	3 - 16	0,5 – 1,5

Fonte: DIMM Universidade de Cagliari

2.4.2 *JET-FLAME* X FIO DIAMANTADO

Embora o *Jet-Flame* ainda seja largamente usada pelas empresas que visam uma utilização imediata a baixo custo, as perspectivas futuras ficam condicionadas a diversos fatores, como por exemplo o alto custo operacional (combustível), limitações de uso em função da característica da rocha (veios, falhas e fraturas), impacto ambiental acentuado (ruído, produção de poeiras tóxicas).

Foi feita uma comparação do rendimento de uma lavra de rocha tipo granítica com fio diamantado e outra com *Jet-Flame*. Os parâmetros técnicos obtidos entre o corte com o fio diamantado e *Jet-Flame* são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.3– Parâmetros técnicos entre o corte com o fio diamantado e *Jet-Flame* em rocha granítica (ALENCAR *et al.*, 1996).

MODALIDADE OPERACIONAL E PRESTAÇÃO	PARÂMETROS	
	Fio Diamantado	Jet - Flame
Velocidade do corte (m ² /h)	1,5 – 6,0	1,0
Largura do corte (cm)	1,0 – 1,2	6,0 – 10,0
Desvio superficial (cm)	1,0 – 4,0	10,0 – 30,0
Consumo de água (m ³ /h)	3,0	---
Mão-de-obra (nº de homens)	1,0	2,0
Nível do ruído (dB)	70,0	130,0

Fonte: DIMM Universidade de Cagliari

CARANASSIOS (1993) e BORTOLUSSI *et al.* (1989), chamam atenção que, em comparação com outras técnicas tradicionais, o fio diamantado garante um aumento na recuperação e uma melhor qualidade do produto, seja pela regularidade geométrica do corte, seja pela redução de danos no material, além de evitar os problemas ao meio ambiente.

2.4.3 CRITÉRIOS DE ESCOLHA DAS TÉCNICAS DE CORTE

Os métodos de lavra podem ser realizados adotando-se diversas técnicas, cuja escolha depende do tipo de rocha, dos condicionantes geométricos e das restrições operacionais de cada método. Em virtude do considerável progresso atribuído à expansão da atividade do setor, estão disponíveis soluções integrais ou combinadas capazes de satisfazer às exigências técnicas de produção para variada gama de situações das pedreiras (BORTOLUSSI *et al.*, 1988 *Apud* VIDAL, 1999, p.81).

As Tabelas 2.3 e 2.4 fazem uma revisão das tecnologias existentes sendo suas aplicações relativas ao mármore e granito e dependentes das condições técnico-econômicas, de operação das etapas de lavra, da sua localização, bem como das características dos produtos intermediários e finais.

Tabela 2.4 – Comparação técnico-econômica das tecnologias existentes para a lavra de mármore (BORTOLUSSI *et al.*, 1988 *Apud* VIDAL, 1999, p.85).

MODALIDADE OPERACIONAL E PRESTAÇÃO	PARÂMETROS TÉCNICOS					
	EXPL	FH	FD	CC	PC	CMH
Velocidade de corte (m ² /h)	-	2-3	10-12	5-7	-	-
Largura do corte (mm)	-	9-10	11-12	40-50	-	-
Rugosidade (cm)	5-8	1-2	2-4	0-1	2-3	4-8
Espessura da zona de desperdício (cm)	10-15	-	-	-	-	-
Dedução comercial (cm)	15-23	1-2	2-4	0-1	2-3	4-8
Custos de corte unitário (US\$/m ²)	20-25	30-40	18-24	23-32	28-38	19-24
Valor perdido (*) (US\$/m ²) de acordo com a qualidade da rocha:						
200 US\$/m ³	30-46	2-4	4-8	0-2	4-6	8-16
400 US\$/m ³	60-92	4-8	8-16	0-4	8-12	16-32
800 US\$/m ³	120-184	8-16	16-32	0-8	16-24	32-64

Fonte: DIMM Universidade de Cagliari

Legenda:

EXPL = Desmonte com explosivos,

FH = Fio helicoidal

FD = Fio diamantado

CC = Cortador à corrente

PC = Perfuração continua

CMH = Cunha mecânica ou hidráulica

(*) Coeficiente de utilização para uma área de corte de 50%.

Tabela 2.5 – Comparação técnico-econômica das tecnologias existentes para a lavra de granito (BORTOLUSSI *et al.*, 1988 *Apud* VIDAL, 1999, p.86).

MODALIDADE OPERACIONAL E PRESTAÇÃO	PARÂMETROS TÉCNICOS					
	EXPL	FH	FD	CC	PC	CMH
Velocidade de corte (m ² /h)	-	1-2	3-4	1-3	-	-
Largura do corte (mm)	-	80-100	11-12	30-50	-	-
Rugosidade (cm)	5-8	4-6	2-4	1-2	2-3	4-8
Espessura da zona de desperdício (cm)	5-10	10-20	-	-	-	-
Dedução comercial (cm)	10-18	14-26	2-4	1-2	2-3	4-8
Custos de corte unitário (US\$/m ²)	23-30	75-90	60-90	35-60	35-40	25-31
Valor perdido (*) (US\$/m ²) de acordo com a qualidade da rocha:						
200 US\$/m ³	20-36	28-52	4-8	2-4	4-6	8-16
400 US\$/m ³	40-72	52-104	8-16	4-8	8-12	16-32
800 US\$/m ³	80-144	104-208	16-32	8-16	16-24	32-64

Fonte: DIMM Universidade de Cagliari.

Legenda:

EXPL = Desmonte com explosivos,

FH = Fio helicoidal

FD = Fio diamantado

CC = Cortador à corrente

PC = Perfuração continua

CMH = Cunha mecânica ou hidráulica

(*) Coeficiente de utilização para uma área de corte de 50%.

Da análise de todos os parâmetros das tabelas 2.4 e 2.5 para cada uma das técnicas apresentadas, constata-se que as que demonstram um melhor desempenho são o fio diamantado e o cortador a corrente. O fio diamantado em relação ao cortador a corrente tem

uma velocidade de corte maior e uma largura de corte menor. Por sua vez o cortador a corrente tem um custo unitário e um valor perdido de acordo com a qualidade da rocha menor do que o fio diamantado.

Embora a técnica de corte a corrente pareça ser a melhor, existem outros fatores como a operacionalidade e os custos iniciais que no Brasil fazem com que o fio diamantado seja a técnica mais aceita pelos exploradores.

2.5 CARACTERIZAÇÃO DA TÉCNICA DE CORTE COM FIO DIAMANTADO

De acordo com CAPUZZI (1988), o aparecimento e o desenvolvimento do fio diamantado decorreram da necessidade de superar as inconveniências técnicas típicas do fio helicoidal.

Atualmente esta nova técnica já difundida em todo o mundo, continua a ser objeto de desenvolvimento e aperfeiçoamento. A melhoria desta técnica tem proporcionado maior velocidade de corte, melhor compartimentação do desmonte da rocha e otimização dos componentes constituintes do próprio fio diamantado.

2.5.1 TEORIA DO CORTE COM FIO DIAMANTADO

A Tribologia é um ramo da engenharia mecânica que se dedica ao estudo do desgaste de produtos oriundos da interação de elementos submetidos a um determinado tipo de atrito. O beneficiamento de rochas ornamentais compreende uma sucessão de etapas de desgaste que se inicia na extração dos blocos até o final do polimento das placas. O desgaste, segundo tal enfoque, se insere no chamado tribossistema, cujo resultado final retrata a interação entre as propriedades intrínsecas da rocha, do abrasivo e das variáveis operacionais do processo (RIBEIRO, *et al.*, 2004).

Por se tratar de um tipo específico de desgaste, o corte com fio diamantado, à luz da Tribologia, pode ser melhor entendido à medida que é possível estudar tal processo considerando um maior número de variáveis que se interagem.

Por apresentar o elemento cortante fixo na liga metálica, o fio diamantado se enquadra na classificação tribológica, como sendo um desgaste do tipo abrasivo a dois corpos (RIBEIRO, *et al.* 2004). A figura a seguir mostra a primeira grande subdivisão dos tipos de desgaste abrasivo (Figura 2.18).

Figura 2.18 – Tipos de desgaste abrasivo (ZUM GAHR, 1987).

De acordo com trabalhos realizados na área da Ciência dos Materiais, o desgaste abrasivo a dois corpos se caracteriza por apresentar um melhor rendimento e uma superfície mais lisa se comparado ao processo que utiliza abrasivos soltos (abrasão a três corpos). Comparado com os abrasivos livres, a rugosidade média (R_a) obtida por processo a dois corpos é de $1/5$ a $1/10$ (KUMAGAI *et al.* 1965 *apud* TOMITA & EDA, 1996) (Figura 2.23).

Figura 2.19 – Relação entre o tamanho do abrasivo, tipo de desgaste e rugosidade média (TOMITA & EDA, 1996)

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

- Abrasão por riscamento – Também conhecido com abrasão em baixas tensões, este tipo se dá por contato da superfície com partículas abrasivas, em que, devido à baixa tensão envolvida, não ocorre fragmentação do abrasivo. As tensões causadas são devidas, principalmente, à velocidade relativa entre os corpos (velocidade de corte). Este é o tipo em que melhor se enquadra a abrasão verificada no corte de rocha com fio diamantado;

- Abrasão por goivamento – Devido às altas tensões envolvidas neste processo, o goivamento envolve a remoção de partículas relativamente grosseiras da superfície do corpo. Este tipo de desgaste envolve a fragmentação das partículas abrasivas e remoção de grande quantidade de material da peça de trabalho (RABINOWICZ, 1966).

2.5.1.1 ABRASIVOS

O termo abrasivo pode ser definido como sendo uma partícula ou grão capaz de causar rápido ou eficiente desgaste em uma superfície sólida (STACHOWIAK & BATCHELOR, 1993).

A palavra abrasão provém do latim “*abradere*” o que significa arrancar partículas de um material por atrito com outro material, quase sempre mais duro (CETEMAG, 2003).

A capacidade de determinado abrasivo em remover material submetido ao processo de desgaste é chamada de abrasividade.

2.5.1.2 PRINCIPAIS FATORES QUE INFLUEM NA ABRASIVIDADE

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

- Estrutura do material;
- Dureza do material;
- Comportamento mecânico;
- Forma do grão;
- Distribuição granulométrica;
- Tamanho médio dos grãos.

AGUS *et al.* (1995 e 1996) introduziram um parâmetro (P_{Abr}) para a avaliação do material abrasivo:

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

onde:

H_p = Dureza do material abrasivo;

S = Forma da partícula;

ρ = Peso específico do material;

d = Diâmetro da partícula;

m = Taxa de fluxo de massa.

2.5.2 CONSTITUINTES DO FIO DIAMANTADO

O fio diamantado é constituído por um cabo de aço galvanizado de 5 mm de diâmetro, que funciona como suporte para as pérolas diamantadas, as quais são separadas, ao longo do cabo por molas metálicas quando utilizado na extração de blocos de “mármore” (Figura 2.24) ou por material plástico ou borracha, quando utilizado para rochas silicatadas (Figura 2.25). Geralmente o comprimento do fio diamantado, usado em lavra de rocha granítica, varia de 50 metros a 70 metros.

Figura 2.20 – Constituição do fio diamantado de mola com montagem simétrica (DIAMANT-BOART, 2005).

Figura 2.21 – Constituição do fio diamantado vulcanizado (borracha).

Normalmente a montagem do fio diamantado é realizada obedecendo a uma frequência de 29 a 35 pérolas/metro, para “mármore” e 39 a 41 pérolas/metro, para “granitos”.

A montagem das pérolas no cabo de aço varia consoante a finalidade a que se destina o fio diamantado. A seguir são descritas as duas técnicas de montagem usadas.

- montagem por mola: consiste em introduzir alternadamente no cabo de aço as pérolas, as molas e os aros que são engastados para consolidar o conjunto. Este tipo de montagem é muito utilizado nas pedreiras de mármore e realizado nas próprias pedreiras.

- montagem por injeção de um polímero, que pode ser plástico ou borracha vulcanizada. Inicialmente as pérolas são inseridas no cabo de aço, a posterior o conjunto é levado para um molde onde se estabelece o espaçamento e se introduz o revestimento (Figura 2.26). Este procedimento tem a vantagem de proteger o cabo transportador da abrasividade das lamas de corte. Além disso, a utilização dos cabos injetados é menos perigosa: em caso de ruptura, as pérolas mantêm-se fixas no cabo, o que não é garantido com os cabos não injetados.

Figura 2.22 – Molde de injeção do revestimento no fio diamantado (STEINVARZ, 2005).

2.5.2.1 CONSTITUIÇÃO DAS PÉROLAS DIAMANTADAS

As pérolas são constituídas por um anel metálico (aço) que suporta um conjunto de segmentos diamantados, também chamados de pasta diamantada, que são compostos por uma liga metálica e grãos de diamante e são as peças responsáveis pelo corte. O diâmetro externo da pérola varia de 10,0 mm até 11,5 mm e tem comprimento de 6 mm, de acordo com o

fabricante e o tipo de pérolas (Figura 2.27). Durante o corte, este diâmetro diminui, até atingir o anel metálico ficando sem a pasta diamantada e, portanto, com função prejudicada. Este anel possui diâmetro que pode atingir até 7,0 mm, também de acordo com o fabricante e o tipo de pérola. Geralmente, o número de pérolas dos fios diamantados pode variar de 32 a 40 por metro.

Figura 2.23 – Detalhe do formato da pérola diamantada (CARANASSIOS & PINHEIRO 2004).

Os diamantes extraídos da natureza são purificados, processados e classificados de acordo com o tipo de função que desempenham. No início dos anos 50, grandes companhias passaram a produzir diamante sintético, o qual é obtido através da exposição do grafite a altas temperaturas e altas pressões de compressão. É o mineral mais duro que se conhece, apresentando dureza 10 na escala de Mohs.

O elemento cortante do fio diamantado é o diamante, que se encontra inserido na pérola. A qualidade, a concentração e o tamanho dos diamantes são definidos pelo tipo de rocha a ser cortada.

O ligante é responsável pela retenção dos diamantes nas pérolas e possui dureza definida de acordo com o tipo de material a ser cortado, o que permite o surgimento de novos diamantes de maneira mais ou menos rápida.

A pasta diamantada é depositada nos anéis de suporte por meio de processos de eletrodeposição ou por sinterização.

2.5.2.1.1 ELETRODEPOSITADAS

O fio diamantado com pérolas eletrodepositadas foi o primeiro a ser introduzido no mercado. As suas pérolas são feitas com um suporte anelar em aço, onde são depositados por eletrólise, através de banhos galvânicos, os grãos de aproximadamente 0,30 a 0,40 quilates de diamante sintético com granulometria entre 40 a 60 mesh (Figura 2.28). Caracterizam-se ainda pela sua alta robustez, capacidade de corte no arranque e uma velocidade de corte elevada.

O cabo com pérolas eletrodepositadas é o mais adequado para cortes de rochas de baixa dureza e em pequenos cortes, devido ao fato dos diamantes se apresentarem mais protuberantes e, portanto, cortam de maneira mais eficaz, mesmo que com maior desgaste. Sua velocidade de corte decresce regularmente com o tempo e, em função do tipo de aplicação, permitem a utilização de máquinas de baixa potência (25 hp) e uma refrigeração reduzida (entre 10 a 20 l/min) (CARANASSIOS & PINHEIRO, 2004).

Figura 2.24 – Pérola Eletrodepositada (CARANASSIOS & PINHEIRO 2004).

2.5.2.1.2 SINTERIZADAS

O processo de sinterização foi concebido para produzir pérolas para cortar todos os tipos de rocha (incluindo as rochas mais duras e mais abrasivas) e para aumentar o número de m² cortados (alguns o qualificam de cabo de "longa duração").

De acordo com (CARANASSIOS & PINHEIRO, 2004), o processo de sinterização consiste na homogeneização de uma poeira diamantada com poeira metálica, formatadas de forma cilíndrica desejada e submetidas à alta pressão e temperatura, em equipamentos especiais denominados de sinterizadores. Este processo é mais indicado para o corte de rochas duras e abrasivas, pelo fato de permitir uma homogênea distribuição dos diamantes na pasta diamantada, que, em se consumindo, liberam novos diamantes até o esgotamento da pasta diamantada da pérola (Figura 2.29).

As composições das ligas metálicas, a concentração e a granulometria dos grãos de diamantes são escolhas que dependem do tipo de aplicação, assim como acontece nos segmentos diamantados de discos e de lâminas.

Figura 2.25 – Pérola Sinterizada (CARANASSIOS & PINHEIRO 2004).

A grande vantagem entre os dois tipos de pérolas é que nas eletrodepositadas a velocidade de corte decresce linearmente com o uso, devido a existência de uma única camada de diamantes, enquanto que nas sinterizadas a velocidade de corte é mantida constante durante a vida útil da pérola (Figura 2.30). Além disso, a longevidade do fio

diamantado com pérolas sinterizadas é, muitas vezes, o dobro da do fio com pérolas eletrodepositadas e por um custo pouco mais elevado.

Figura 2.26 – Mecanismo de desgaste das pérolas sinterizadas e eletrodepositadas. Os quadrados tracejados indicam a inexistência de diamantes na pérola (CARANASSIOS & PINHEIRO 2004).

2.5.3 TIPOS DE FIOS DIAMANTADOS

Na fabricação dos fios diamantados existem três formas bem distintas de revestimento do cabo de aço, a mola, a plastificação e a vulcanização (borracha) (Figura 2.31). O que define a escolha de um ou de outro tipo de fio é a finalidade em que eles vão ser aplicados, isto é, em que campo de aplicação vão ser usados, tipo de rocha (mármore ou granito) e local (pedreiras ou serraria monofio ou multifio).

Figura 2.27 – A diversidade de fios diamantados existentes no mercado. Fios vulcanizados (a), (b) e (c); fios com molas (d) e (e); fio plastificado (f).

2.5.3.1 FIOS COM MOLA

Os primeiros fios diamantados usados possuíam molas. Eram constituídos basicamente por um cabo de aço, pérolas e molas metálicas (Figura 2.32), estas últimas mantinham o espaçamento entre as pérolas e absorviam os choques do fio contra rocha. A constituição básica dos fios, que por vezes, era montado nas pedreiras, começou a dar problemas no cabo de aço, isto, porque não existia proteção do cabo contra potenciais agentes de contaminação (poeiras, água, etc.) e com isso a sua deteriorização era muito rápida.

Por motivo de segurança, os fios com mola possuem anéis de fixação a intervalos constantes do fio, evitando que, em caso de rompimento do cabo de aço, sejam lançadas todas as pérolas. Estes anéis também permitem minimizar o deslocamento das pérolas devido à expansão / retração das molas.

Figura 2.28 – Fio diamantado de mola com anéis de fixação.

2.5.3.2 FIOS COM PLÁSTICO

Com a finalidade de minimizar o problema das contaminações no cabo de aço foi desenvolvido o sistema de espaçadores plásticos em função da maior abrasividade que os granitos apresentam. A lama abrasiva ocasiona um desgaste excessivo do cabo, resultando em quebra prematura e o fim da sua vida útil, apesar das pérolas ainda estarem sãs. Para se conseguir essa proteção é injetado um plástico de forma a preencher os espaços entre os anéis diamantados e o cabo de aço (Figura 2.33). Desta forma, o plástico protege o cabo de aço da erosão ocasionada pela lama abrasiva (CARANASSIOS, 1993).

Figura 2.29 – Fio diamantado plastificado com mola e sem mola.

2.5.3.3 FIOS COM BORRACHA (VULCANIZADOS)

A vulcanização é um processo termoquímico aplicado aos polímeros elastoméricos (borrachas) que devido à vulcanização, adquirem propriedades físicas que as tornam adequadas a várias aplicações, como, por exemplo, elemento integrante dos fios diamantados. O processo consiste em envolver com borracha o cabo de aço e os espaços vazios deixados entre as pérolas e o cabo, de forma a tornar os componentes interligados (Figura 2.34). Esta técnica torna o cabo mais pesado, porém mais flexível.

Figura 2.30 – Fio diamantado vulcanizado (sem uso).

2.5.4 EQUIPAMENTO DE CORTE

Depois da apresentação das variáveis rocha e fio diamantado, será tratada a máquina de acionamento e seus acessórios o que representa o terceiro elemento do sistema tribológico existente na lavra de rochas ornamentais.

Os equipamentos usados na técnica de corte com fio helicoidal serviram de base para o desenvolvimento do aparato de fio diamantado. Os estudos iniciais para construção da máquina para acionamento do fio diamantado surgiram no início da década de 70. Os primeiros protótipos começaram a operar por volta de 1977. Esses equipamentos eram totalmente hidráulicos e com baixa potência instalada (CAPUZZI, 1988).

Em um período de 15 anos registrou-se um contínuo progresso nos equipamentos de acionamento do fio diamantado. O grande avanço dessas máquinas foi obtido com o advento dos equipamentos automáticos com regulagem eletrônica e instalação de motores de maior potência (Figura 2.35).

Figura 2.31 – Modelo de máquina para o acionamento do fio diamantado com regulação eletrônica (IMPrensa, 2005).

As máquinas de fio diamantado, utilizadas atualmente em lavra de granitos ornamentais, são basicamente movidas a eletricidade e apresentam grande robustez, com ótima estabilidade e desempenho, mesmo nos cortes de grandes dimensões. Consistem de uma plataforma utilizada para abrigar a motorização e o deslocamento da máquina é realizado por meio de um sistema cremalheira-pinhão, ou por patins solidários ao chassi, que deslizam sobre os trilhos. O seu acionamento é feito à distância, por meio de um painel de comando (Figura 2.36). De modo geral, o volante principal possui diâmetro que varia de 500 mm a 1.000 mm e é posicionado na máquina lateralmente aos trilhos, possibilitando ser rotacionado 360°, o que permite a execução de cortes verticais paralelos e de levante (corte horizontal). O volante é responsável pelo movimento de translação (circular) do fio, cujo tensionamento é feito de maneira controlada, por meio do deslocamento para trás da unidade tracionadora. As polias, que servem como guia para o fio diamantado, tem um diâmetro de aproximadamente 350 mm.

Figura 2.32 – Seccionamento de pranchas com fio diamantado na extração do granito Branco Ceará (PAULA, 2005).

Os parâmetros mais importantes que devem ser observados na máquina de corte são a potência e a velocidade periférica linear. No que se refere à potência do motor principal, ela vai influir significativamente na capacidade de trabalho do fio diamantado. Além da potência, a rotação do motor principal (rpm) é fator determinante para obtenção do torque, que é dado pela equação:

$$\Delta F = k \times \frac{P}{rpm}$$

Onde:

ΔF = Torque do motor principal, kgfm;

P = Potência do motor principal, cv;

rpm = Revoluções por minuto do motor principal;

k = 716 (constante).

Quanto maior o torque, maior poderá ser o comprimento do fio em contato com a rocha, possibilitando a realização de cortes com maiores dimensões. Não importa a área de corte a ser realizada, mas sim a dimensão em que o fio será arrastado, devendo esta dimensão ser compatível com o torque da máquina.

De acordo com CARANASSIOS & PINHEIRO (2004), a velocidade periférica ou linear do fio diamantado, em circuito fechado é inversamente proporcional à dureza da rocha. Nos mármore, varia de 35 m/s a 40 m/s e, nos granitos, de 16 m/s a 28 m/s, sendo obtida a partir do diâmetro do volante juntamente com as revoluções do motor, ou seja:

$$V_p = C_{cv} \times \frac{rpm}{k}$$

Onde:

VP = Velocidade Periférica (m/s);

Ccv = Comprimento da circunferência do volante (m);

rpm = Revoluções por minuto do motor principal;

k = 60 (constante).

2.5.5 CICLO OPERACIONAL

Para a realização do corte com fio diamantado é necessário efetuar um conjunto de passos visando o seu bom funcionamento (CARANASSIOS & PINHEIRO, 2004). A seguir são apresentadas as principais etapas operacionais do corte com fio diamantado.

- Realização de furos: na execução de cortes com fio diamantado torna-se necessário à realização de furos coplanares que irão determinar a superfície a ser cortada. Utiliza-se uma perfuratriz denominada de *down-the-hole* ou fundo-de-furo, destinada à realização dos furos horizontais e verticais, com diâmetro da ordem de 90 mm a 105 mm (Figura 2.37).

Figura 2.33 – Perfuratiz realizando um furo horizontal.

- Instalação de polias guias: as polias guias ou auxiliares deverão ser instaladas alinhadas em função do corte a ser realizado.

- Instalação do fio: a introdução do fio diamantado nos furos é realizada com o auxílio de um fio de nylon que é transportado, por ar comprimido até a sua saída no furo (Figura 2.38). Amarra-se então o fio diamantado no cordão, que será puxado até a sua passagem pelos furos.

Figura 2.34 – Introdução do fio diamantado com ajuda de um fio de nylon e ar comprimido (Foto cedida pelo Eng. José Roberto Pinheiro).

- Aplicação de torção: uma vez montada a máquina, as polias e introduzido o fio diamantado nos furos, o procedimento seguinte consiste na aplicação de torções que podem

variar de 1,5 a 2,0 voltas por metro de fio, para se obter um desgaste homogêneo das pérolas. As voltas devem ser divididas pelas duas pontas do fio e ser dadas no mesmo sentido do trançado do cabo de aço (Figura 2.39).

Figura 2.35 – Aplicação da torção no fio diamantado antes da execução da emenda (Foto cedida pelo Eng. José Roberto Pinheiro).

- Emenda: a maneira mais prática de “fechar” um fio diamantado é engastar nas suas extremidades tubos ou elementos de aço com rosca (Figura 2.40).

Figura 2.36 – A diversidade de tipos de uniões existentes no mercado.

- Circulação preliminar do fio: após o circuito do fio diamantado estar “fechado” e pronto para o corte, deve-se puxar o fio no sentido que irá circular como mostra a Figura 2.41. Assim permite verificar que ele não está preso na rocha ou nas polias, evitando uma possível ruptura do fio.

Figura 2.37 – Antes do acionamento da máquina, o fio é puxado manualmente (Foto cedida pelo Eng. José Roberto Pinheiro).

- Início do corte: deve ser aplicada uma baixa velocidade periférica, que deverá ser aumentada gradativamente à medida que se obtenha o arredondamento das quinas do corte. Nesta fase inicial de corte, o fluxo de água deve ser maior.

- Após a fase inicial de corte e, caso a máquina possua controle de velocidade, deve-se adequar a velocidade linear do fio (m/s) ao tipo de material cortado.

- Refrigeração do fio: o fio diamantado deve transportar a quantidade necessária de água para sua refrigeração, ao longo de toda a extensão do corte, de maneira a promover, também, a expulsão do material cortado (Figura 2.42).

Figura 2.38 – Verificação da quantidade de água usada no corte (Foto cedida pelo Eng. José Roberto Pinheiro).

- Paralisações: checagem periódica do diâmetro médio das pérolas, para controle do desgaste. Particularmente, deve-se verificar com cuidado redobrado o estado das pérolas situadas junto à emenda (Figura 2.43).

Figura 2.39 – Checagem do diâmetro das pérolas durante o corte (Foto cedida pelo Eng. José Roberto Pinheiro).

- Finalização do corte: na fase de término do corte é recomendável diminuir a velocidade de avanço da máquina, devido ao aumento de desgaste das pérolas, que sofrerão “*stress*” provocado pela diminuição do raio de curvatura do fio. É importante, neste momento, salvaguardar os fios novos, substituindo-os por fios velhos.

Após a conclusão do corte, deve se calcular a velocidade média que será obtida a partir da relação entre a área cortada e o tempo efetivo de trabalho e medir o desgaste das pérolas, para controle de rendimento médio (m^2/h).

2.5.6 CORTES REALIZADOS COM FIO DIAMANTADO

O fio diamantado nos dias de hoje, pode ser utilizado em todas as operações de corte numa pedreira, sem dúvida, de forma mais destacada na extração primária de blocos. A Figura 2.44 representa de uma forma esquemática os processos mais comuns de extração de blocos. Inicia-se por realizar furos coplanares 1, 2 e 3 como indicado na Figura 2.44a, que permitem a passagem do fio diamantado tanto para cortes verticais (laterais) como para os cortes horizontais (levante) (Figura 2.44b). O corte da face posterior da massa rochosa é feito com uso de explosivo (cordel e/ou pólvora negra) (Figura 2.44c). Esse volume desmontado é desdobrado em volumes secundários (filões/pranchas) (Figura 2.44d), que serão tombados e esquadrejados em blocos (Figura 2.44e).

Figura 2.40 – Ciclo de corte com fio diamantado (COELHO & VIDAL, 2003).

O corte com fio diamantado tem por princípio básico puxar uma alça formada pelo fio diamantado, enlaçada na rocha pelos dois furos que se interceptam, formando um circuito fechado, onde através do movimento de translação (circular) do fio e da constante força de tração exercida sobre ele, promove-se o desenvolvimento do corte.

Em conjunto com a máquina do fio diamantado existem alguns acessórios, com os quais se podem obter uma maior variedade de cortes, consoante a necessidade da frente de lavra.

2.5.6.1 CORTE VERTICAL NORMAL

O corte vertical é o mais comumente utilizado devido a sua simplicidade. É utilizado para cortes laterais onde o espaço para o movimento da máquina não é problemático (Figura 2.45). São colocadas ainda duas polias de forma a auxiliar o corte.

Figura 2.41 - Dispositivo para início e fim de corte. (MARINI QUARRIES GROUP, 2005).

2.5.6.2 CORTE VERTICAL EM “L”

Por vezes o espaço em pedreira torna-se limitado, devido ao número de frentes de lavra e ou acentuada irregularidade do terreno, dessa forma existe a necessidade de alguns artifícios. No caso do corte vertical em “L”, a máquina está impossibilitada de se movimentar no sentido paralelo ao corte. Desta forma coloca se uma torre formada por duas polias na parte superior e duas na parte inferior, formando assim um “L” entre a máquina e o corte (Figura 2.46).

Figura 2.42 - Dispositivo para corte a 90° (em L).

2.5.6.3 CORTE HORIZONTAL NORMAL

Corte horizontal ou também chamado de levante, é o corte efetuado na base do maciço. Para a realização deste corte o volante da máquina é rodado para a horizontal ficando paralelo ao terreno (Figura 2.47).

Figura 2.43 - Dispositivo para corte na horizontal. (MARINI QUARRIES GROUP, 2005).

2.5.6.4 CORTE HORIZONTAL EM “L”

Assim como o corte vertical em “L”, o horizontal em “L” é realizado pelos mesmos motivos. Neste caso, por se trabalhar no solo, não há necessidade de torre; são colocadas duas polias na entrada e na saída dos furos invertendo a direção (Figura 2.48).

Figura 2.44 – Corte de levante em “L” (Foto cedida pelo Eng. José Roberto Pinheiro).

2.5.6.5 CORTE CEGO

Até ao momento foram referidos somente cortes na base da bancada com furos coplanares, mas por vezes o espaço é diminuto ou inexistente e não é possível a execução desses furos. Quando isto acontece surge a necessidade da realização de um corte “cego” (Figura 2.49).

O corte “cego” consiste na realização de dois furos na vertical com diâmetro aproximado de 8” (0,203 m), onde vão ser introduzidas duas torres. Estas torres são constituídas por um tubo que na parte inferior contém uma polia de pequena dimensão (Figura 2.50), que vai estar dentro do furo e na outra extremidade uma polia de tamanho normal que ficara fora do furo. O corte contrariamente a todos os outros que já foram referidos, inicia de fora para dentro daí o nome de corte “cego” (Figura 2.51).

Figura 2.45 – Execução do corte “cego” (Foto cedida pelo Eng. José Roberto Pinheiro).

Figura 2.46 – Detalhe da introdução da haste (torre) com o fio diamantado (Foto cedida pelo Eng. José Roberto Pinheiro).

Figura 2.47 – Vista geral do corte “cego” (MARINI QUARRIES GROUP, 2005).

2.5.7 OUTRAS APLICAÇÕES DO FIO DIAMANTADO

A utilização do fio diamantado estende-se, além das pedreiras, à aplicação nos equipamentos denominados de monofio, utilizados para a fabricação de espessores empregados na indústria da arte funerária, ou ainda para esquadreamento de blocos irregulares (Figura 2.52), possibilitando uma ocupação racional da capacidade de tear e, conseqüentemente aumento da produção na serragem (ALENCAR *et al.*, 1996).

Figura 2.48 – Regularização de um bloco com fio diamantado em máquina estacionária. (DIAMANT-BOART, 2005).

Para cortar um bloco de granito em chapas delgadas, recorre-se muitas vezes ao procedimento clássico do engenho de granalha por duas razões principais, a saber: custo muito competitivo e procedimento bem controlado. Os inconvenientes são, no entanto evidentes: a produtividade limitada (7 cm/h) e, por isso, a menor flexibilidade, a reciclagem das águas, o custo da mão-de-obra, o aumento do custo de corte por m² para as chapas espessas e a grande superfície de implantação. É por estas razões que esta aplicação foi objeto de inúmeras tentativas de desenvolvimento de máquinas equipadas com ferramentas diamantadas (Figura 2.53), que levaram hoje à colocação no mercado de máquinas de corte multifios (Figura 2.54).

Figura 2.49 – Fio diamantado para aplicação em multifio. Os cabos são sempre injetados de plástico transparente (DIAMANT-BOART, 2005).

Figura 2.50 – Corte de bloco no tear com fio diamantado (PENSEDMA, 2005).

Segundo ALENCAR *et al.* (1996), o desenvolvimento da tecnologia do fio diamantado permitiu a construção de equipamentos especiais destinados à produção de objetos bidimensionais para o emprego na indústria de decoração e urbanística. Para a fabricação desses objetos foram concebidos equipamentos especiais acoplados a computadores, capazes de executar cortes em blocos de mármore, granito e outras rochas por meio de desenhos que são executados através de programas computacionais (Figura 2.55).

Figura 2.51 – Execução de cortes em blocos de rocha por meio de desenhos que são executados através de programas computacionais (DIAMANT-BOART, 2005).

2.5.8 VANTAGENS

DANESI (1997) e CARANASSIOS & PINHEIRO (2004) concluíram que o emprego da tecnologia do fio diamantado permite a organização racional dos trabalhos de lavra, através da realização do planejamento da atividade extrativa, otimizando o ciclo de produção da pedreira. Podemos citar como principais vantagens:

- Manutenção da integridade física da rocha, com nenhum tipo de dano à mesma;
- Espessura média de corte de apenas 10 mm, o que é insignificante quando comparado a outras tecnologias;
- Regularidade e excelente acabamento das superfícies cortadas;
- A partir dos três itens acima, tem-se uma maior qualidade da produção, com obtenção de um maior volume comercial de blocos, eliminando-se os tradicionais “descontos”;
- Elevadas velocidades de corte (m^2/h), com ganhos de produtividade;
- Menor custo unitário de corte ($\$/\text{m}^2$), em relação a tecnologias tradicionais de corte;
- Melhor relação custo-benefício, com comprovada viabilidade econômica;
- Versatilidade de uso para as mais variadas condições operacionais, permitindo a realização dos mais variados tipos de cortes;
- Atividade silenciosa, com ausência de poeira e vibrações, contribuindo para melhoria das condições de trabalho.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O mundo da rocha ornamental está em constante desenvolvimento e crescimento. Na Europa onde o desenvolvimento tecnológico é mais marcante nem sempre é possível usufruir dessas tecnologias por motivos adversos. No caso de Portugal foi possível constatar que apesar de ser um país onde os equipamentos e insumos se encontram ao alcance, o fio diamantado não é uma técnica muito utilizado para lavras de granito. Como se pode observar na Figura 3.1 o aspecto da paisagem granítica é muito irregular e com zonas de fraturamento superficial o que limita a utilização do fio diamantado. Só nas pedreiras de grande porte, que não é o caso da Figura 3.2, se utiliza o fio diamantado porque só a uma determinada profundidade, onde o maciço se torna menos fraturado, é possível usar essa técnica.

Figura 3.1 – Aspecto da paisagem granítica no norte de Portugal

Figura 3.2 – Pedreira da empresa Pedra Nossa em Pedras Salgadas, Portugal.

O Brasil, devido a sua extensão territorial e à extraordinária diversidade geológica, tornou-se um país muito competitivo em termos de rochas ornamentais. Nos últimos anos notou-se uma forte expansão do setor, seja do ponto de vista de amplitude da sua utilização,

seja no desenvolvimento de novas tecnologias para a sua produção. Com relação ao incremento no emprego e utilização das rochas ornamentais, as empresas foram obrigadas a elevar seus atuais níveis produtivos e ao mesmo tempo melhorar a qualidade do produto.

O avanço tecnológico no país tem tido uma evolução marcante, principalmente no que diz respeito a economia. Nas feiras que se realizam anualmente, em particular na “Feira Internacional do Mármore e Granito” realizada em Vitória/ ES, foi observado esse crescimento, o tem despertado, cada vez mais, o interesse de investidores estrangeiros.

3.1 SELEÇÃO DAS ROCHAS ESTUDADAS

Segundo o DNPM (1996), se não considerarmos o petróleo e gás natural, o granito ganha mais importância dentro do valor da Produção Mineral Brasileira. Ocupa o 13º lugar na classificação dos “minerais” com maiores valores de produção e, juntamente com outros “minerais” que não sofrem transformação da natureza para o uso final, como por exemplo: a areia, o cascalho, a pedra britada, a rocha ornamental, o que corresponde a cerca de 81,40% do total da produção mineral, totalizando um valor de US\$ 7,8 bilhões em comercialização.

Para a seleção do local de estudo, tendo em vista os granitos, foi necessário observar quais os estados têm maior ocorrência desse tipo de rocha associado ao volume de produção.

Na Tabela 3.1 são apresentados dados de produção de rochas ornamentais brasileiras, por tipo, e distribuição geográfica.

Tabela 3.1 – Produção de rochas por regiões e estados brasileiros (CHIODI FILHO, 2004)

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 Miracema
	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	Granito e mármore
	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
	Santa Catarina	80.000	Granito e ardósia
Centro - Oeste	Goiás	150.000	Granito e quartzito foliado
Total		6.000.000	

Os valores da tabela 3.1 permitem constatar que 47,5% da produção total do Brasil se encontra no estado de Espírito Santo e por este motivo foi escolhido para realização da presente pesquisa. Ela se restringiu ao município de Barra de São Francisco (Figura 3.3) e arredores que são os locais onde se encontra a maior concentração de lavras de granito ornamental. Os tipos de granitos estudados foram o Ouro Brasil e o *Desert Storm* por serem de alto valor econômico (aproximadamente US\$ 600/m³), consagrado internacionalmente e por possuírem diferenças geológicas.

Figura 3.3 – Mapa do Estado do Espírito Santo com destaque para o município de Barra de São Francisco.

De maneira geral, estes tipos de rochas constituem parte central de um extenso cinturão de rochas metamórficas dos fácies Anfibolito e Granulito, que se estende marginalmente à orla Atlântica desde o sul até o norte do país, frequentemente denominado de Cinturão Granulítico Atlântico (PINHEIRO *et al.* 1978).

MENDES (2002) relata ainda que os eventos tectônicos atuantes e o ambiente geológico condicionaram a existência e distribuição das rochas, incluindo a vocação dos terrenos para materiais comuns, ou os tipos excepcionais de caráter mais nobre. Nesse contexto a cor, textura, deformação estrutural, características físico-mecânicas e o quadro aproximado de reservas estão diretamente relacionados aos eventos tectônicos atuantes, criando, assim, os condicionantes geológicos regionais e locais formadores de tais jazidas.

3.2 TRABALHO DE CAMPO

Os trabalhos foram realizados em duas etapas, uma compreendida de visitas a empresas produtoras de máquinas e fios diamantados, para melhor conhecer o produto e seu funcionamento e a outra constou de observações nas pedreiras que operam com fio diamantado de pérolas sinterizadas. As pedreiras visitadas que explotam o “granito” Ouro Brasil e *Desert Storm* (Figura 3.4 e 3.5) têm em média uma produção de aproximadamente 1.100 m³/mês.

Figura 3.4 – Vista das pedreiras onde se extrai o “granito” Ouro Brasil. O maciço rochoso é explorado por quatro empresas.

Figura 3.5 – Vista da pedreira onde se extrai o “granito” *Desert Storm*.

3.2.1 AMOSTRAGEM

Foram coletadas amostras das rochas para caracterização tecnológica (Figura 3.6) e de fios diamantados para análise das principais feições observadas antes e após o corte no maciço rochoso.

Figura 3.6 – Redução das dimensões da amostra do “granito” Ouro Brasil para transporte ao laboratório.

3.3 TRABALHOS DE LABORATÓRIO

Os trabalhos de laboratório foram desenvolvidos no Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos-USP e no laboratório da União de Ensino de Barra de São Francisco – UNESF, na cidade de Barra de São Francisco – ES.

3.3.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

Do “granito” Ouro Brasil foram extraídos seis corpos-de-prova para o ensaio de compressão uniaxial. A disposição da foliação da rocha escolhida para extração dos mesmos foi de 45 graus, visto que uma das características desse material como produto final (chapa), é apresentar sua estrutura disposta com esta inclinação, como pode ser observado na Figura 3.8.

Figura 3.7 – Detalhe do: (a) corpo-de-prova extraído; (b) produto final - ladrilho. Notar em tracejado vermelho a ocorrência da estrutura foliada.

No que se refere ao “granito” *Desert Storm*, a amostragem foi realizada de maneira diferente. O material é heterogêneo, de tal forma, que não mostra um plano de foliação bem

definido no maciço rochoso nem no produto final (Figura 3.9). Assim sendo, optou-se por retirar três corpos-de-prova o mais próximo de cada uma das direções possíveis em relação à foliação (paralelas, perpendiculares e oblíquas) conforme a Figura 3.10.

Figura 3.8 – Exemplo de uma placa obtida para o “granito” *Desert Storm*.

Figura 3.9 – Detalhe dos corpos-de-prova extraídos do “granito” *Desert Storm* (a) planos perpendiculares; (b) planos paralelos e (c) planos oblíquos (aproximadamente de 45 graus).

Os corpos de prova cilíndricos obtidos foram extraídos com o auxílio de uma perfuratiz com uma coroa de aproximadamente 7,5 cm de diâmetro interno (Figura 3.11), cortados com serra circular para obtenção das dimensões desejadas (altura 7,5 cm) (Figura 3.12) e posteriormente submetidos a retificação (Figura 3.13).

Figura 3.10 – Extração dos corpos-de-prova com coroa diamantada ($\phi = 7,5$ cm) do “granito” Ouro Brasil.

Figura 3.11 – Redução dos corpos-de-prova cilíndricos para as dimensões especificadas nos ensaios de compressão.

Figura 3.12 – Retífica automática com rebolo diamantado em operação nos corpos-de-prova do “granito” Ouro Brasil.

Para os ensaios de abrasão profunda e desgaste Amsler os corpos-de-prova foram obtidos de ladrilhos comerciais cortados em serra circular para obtenção das dimensões desejadas conforme as respectivas normas.

Os 10 corpos-de-prova de cada rocha utilizados para determinação dos índices físicos, foram obtidos por redução de amostras até obter um peso aproximado de 250 g cada.

3.3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os ensaios realizados para os dois “granitos” foram escolhidos de forma a obter uma caracterização tecnológica tendo em conta o uso do fio diamantado.

A descrição dos ensaios foi feita com base na descrição de FRAZÃO & PARAGUASSU, (1998), em catálogos de rochas ornamentais e nas normas da ABNT e ASTM.

3.3.2.1 ANÁLISE PETROGRÁFICA

Para a caracterização petrográfica dos materiais comerciais estudados foi adotada a descrição convencional, abordando feições composicionais e aspectos texturais e estruturais conforme orientações contidas na norma NBR 12768 (ABNT, 1992a) e complementadas das recomendações presentes em Navarro (1998), Rodrigues *et al.* (1996, 1997) e Artur *et al.* (2001).

A descrição microscópica foi efetuada em microscópio monocular de luz transmitida da marca Leitz através de seções delgadas das rochas com área de 3,5 cm x 2,5 cm e espessura de 0,3 μ m. A descrição das feições texturais e estruturais macroscópicas gerais do material denominado comercialmente de *Desert Storm* foi efetuada através da observação de chapas polidas e expostas na empresa Monte São Granitos, com dimensões aproximadas de 2,0 x 1,5 m.

A determinação da composição modal foi realizada de forma integrada através da contagem dos minerais em lâminas delgadas e em placas de rochas, com dimensões de cerca de 25 cm x 11 cm, dos materiais estudados. Para a contagem mineral em lâminas delgadas foram contados entre 300 a 500 pontos de cada lâmina utilizando um contador automático digital marca Swift, acoplado ao microscópio petrográfico. Para a identificação dos minerais nas placas, estas foram atacadas com ácido fluorídrico e em seguida tratadas com cobalto-nitrito de sódio conforme recomendado por Moraes & Rodrigues (1978), permitindo distinguir macroscopicamente feldspato potássico e plagioclásio em cada tipo granítico. Na contagem dos minerais através das placas utilizou-se uma rede com espaçamento de 0,5 x 0,5 cm, lançadas sobre lâmina de plástico transparente.

3.3.2.2 ÍNDICES FÍSICOS

Os índices físicos são obtidos seguindo a norma NBR 12766 (ABNT, 1992b).

Para se poder avaliar, indiretamente, o estado de alteração e de coesão das rochas é realizada a determinação dos índices físicos, com a finalidade de se obter valores de massa específica seca aparente, porosidade aparente e absorção d'água aparente.

A determinação dos valores dessas propriedades foi obtida pela utilização de dez fragmentos de cada rocha com uma massa aproximada de 250 g que foram pesados ao ar, após secagem em estufa a 110 ± 5 °C (peso A), após saturação em água por 48h (peso B) e na condição submersa, após saturação (peso C).

Os valores para cada um dos índices foram obtidos através das seguintes expressões.

$$\text{Massa específica aparente seca:} \quad MEAS = \frac{A}{B - C} \quad (\text{kg/m}^3)$$

$$\text{Massa específica aparente saturada:} \quad MEASat = \frac{B}{B - C} \quad (\text{kg/m}^3)$$

$$\text{Porosidade aparente:} \quad P.A. = \frac{B - A}{B - C} \times 100 \quad (\%)$$

$$\text{Absorção d'água aparente:} \quad A.A. = \frac{B - A}{A} \times 100 \quad (\%)$$

3.3.2.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL

A norma NBR 12767 (ABNT, 1992e) é adotada para a realização do ensaio de resistência à compressão uniaxial.

O ensaio foi executado em corpo-de-prova regulares cilíndricos extraídos de blocos (conforme descrito em 3.3.1). Os corpos-de-prova na condição seca, foram submetidos a cargas lentas de modo contínuo e progressivo, a uma taxa de carregamento de aproximadamente 0,6 MPa/s até que a ruptura se ocorra.

Sua finalidade é avaliar a resistência da rocha e obter um parâmetro indicativo de sua integridade física.

O resultado da tensão de ruptura na compressão (σ , em MPa) é expresso pela relação entre força (F, em kN) que provoca a ruptura e a área (A, em cm²) de carregamento dos corpos-de-prova.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

3.3.2.4 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRA-SÔNICAS

Com base na norma da *American Society for Testing and Materials* - ASTM D 2845 é possível realizar a determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas longitudinais (m/s), que permite avaliar, indiretamente, o grau de alteração e de coesão das rochas (Figura 2.8). O ensaio foi realizado, em todos os corpos-de-prova destinados ao ensaio de compressão uniaxial e utilizou-se o PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non Destructive Digital Indicating Test*) para a determinação da velocidade de propagação ultra-sônica.

Figura 3.13 – Aparelho utilizado para a determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas num corpo-de-prova (A) cilíndrico do “granito” *Desert Storm* preparado para o ensaio de compressão uniaxial.

Sua importância reside em se tratar de um dos poucos ensaios não destrutivos disponíveis para verificação de propriedades rochosas, sendo assim, também muito empregado na avaliação da degradação de rochas, especialmente nos estudos de recuperação de monumentos históricos em rocha.

3.3.2.5 DESGASTE DE AMSLER

O ensaio de desgaste mede a resistência que uma rocha oferece ao desgaste por atrito superficial, simulando, por exemplo, o tráfego de pedestres. Está intimamente relacionada ao imbricamento dos minerais constituintes.

O ensaio foi realizado na máquina de Amsler, na qual dois corpos-de-prova são submetidos simultaneamente ao desgaste, por areia quatzosa, em uma pista disco giratória circular de aço.

O desgaste é determinado pela redução de altura do corpo de altura do corpo-de-prova para os percursos de 500 e 1.000 m. Os resultados são expressos em milímetros e correspondem à média aritmética dos valores de desgaste dos dois corpos-de-prova.

Este ensaio é regido pela norma NBR 12642 (ABNT, 1992h).

3.3.2.6 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 *Apud* RIBEIRO, 2005, p74).

Para a determinação da abrasão profunda, foram utilizados 2 corpos-de-prova de 10x10x2 cm de cada rocha, obtidos pelo corte de ladrilhos comerciais.

Segundo as diretrizes do Anexo E da norma NBR 13818 (ABNT, 1997), cada corpo-de-prova é colocado no abrasímetro de modo a tangenciar o disco rotativo (Figura 2.10). O reservatório do equipamento é preenchido com alumina (grana 80).

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

Figura 3.14 (a) Ensaio de abrasão profunda no “granito” *Desert Storm*. (b) Abrasímetro.

A resistência à abrasão profunda é expressa em volume de material (mm³), calculado pelo comprimento da cavidade através da expressão:

$$V = \left(\frac{\pi \times \alpha}{180} - \text{sen} \alpha \right) \times \left(\frac{h \times d^2}{8} \right) \quad \text{e} \quad \frac{\text{sen} \alpha}{2} = \frac{C_{\text{cav}}}{d}$$

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;

C_{cav} = comprimento da cavidade (mm).

3.3.3 CAPTAÇÃO DE IMAGEM DO FIO DIAMANTADO

As amostras dos fios diamantados recolhidos nas pedreiras foram submetidos a observações efetuadas em lupa digital da marca *Scalar* com aumento de 50 vezes e com sistema para obtenção de imagens (Figura 3.7). Este equipamento foi disponibilizado pela UNESF – União de Ensino de Barra de São Francisco, localizada na cidade de Barra de São Francisco - ES.

Figura 3.15 – Captação de imagem de uma pérola diamantada (A) com a lupa digital utilizada na pesquisa.

A captação de imagem tem por finalidade espelhar as características do desgaste do fio diamantado. Dessa forma pode-se especular sobre a sua durabilidade e a qualidade do produto cortado.

4 RESULTADOS DE LABORATÓRIO

A caracterização tecnológica é feita por meio de ensaios que determinam as propriedades físicas e mecânicas e objetivam demarcar os campos de aplicação dos materiais conforme padrões normatizados. Dos ensaios existentes para rochas ornamentais só foram feitos os mais importantes para o estudo do corte com fio diamantado.

Para a realização dos ensaios contou-se com o apoio dos laboratórios da Escola de Engenharia de São Carlos (USP) - São Carlos/ SP, Universidade Estadual Paulista (UNESP) - Rio Claro/ SP, Fundação Parque de Alta Tecnologia (PARQTEC) - São Carlos/ SP e União de Barra de São Francisco (UNESF) - Barra de São Francisco/ ES.

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios (conforme descrito no item 3.3.2) para a caracterização tecnológica dos granitos estudados assim como a captação de imagens das pérolas diamantadas.

4.1 ENSAIOS REALIZADOS PARA CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DAS ROCHAS

4.1.1 ANÁLISE PETROGRÁFICA

O ensaio foi realizado com base na norma NBR 12768 (ABNT, 1992a). A descrição petrográfica das duas rochas em estudo será apresentada a seguir.

Nome Comercial: “Granito” *Desert Storm* é um migmatito nebulítico gnaissificado róseo amarelado (Granito Pegmatóide Gnaissificado), que exhibe estrutura foliada, com intensidade variável, mais evidente nas porções mesossômicas (Figura 4.1). Nestas porções exibem discreta alternância entre leitos quartzo-feldspáticos e delgados filetes enriquecidos em sillimanita, biotita e granada de granulação mais fina. Seus minerais essenciais são quartzo (30,0%), feldspato potássico (microclínio - 32,0%) plagioclásio (oligoclásio - 28,0%), biotita (4,0%) e como acessórios opacos (2,5%), sillimanita, granada, apatita e zircão e secundários (< 3,5%) sericita, muscovita, epidoto, clorita, carbonatos, argilo-minerais, óxidos/hidróxidos de ferro.

A rocha exhibe alguns planos descontínuos de microfalhas que ocasionam discretos deslocamentos transversais das estruturas da rocha. Também cabe destacar a presença dos planos melanossômicos, definidos pelas concentrações lineares de cristais de biotita, que representam descontinuidades físicas.

Figura 4.1 – Amostra de um ladrilho do “granito” *Desert Storm*.

Nome Comercial: “Granito” Ouro Brasil é um ortognaisse sienogranítico de coloração róseo clara com estrutura grosseiramente orientada do tipo gnáissica homogênea, inequigranular de granulação média a grossa (Figura 4.2). A estrutura orientada é definida pelo pronunciado estiramento mineral, principalmente dos cristais de quartzo e de feldspatos. Seus minerais essenciais são quartzo (35,0%), feldspato potássico (ortoclásio/microclínio - 44,0%), plagioclásio (oligoclásio - 13,0%), granada (3,5%), biotita (2,0%) e como acessórios opacos (1,0%), apatita, zircão, sillimanita e secundários (1,5%) sericita, epidoto, carbonatos, argilo-minerais, óxidos/hidróxidos de ferro.

Os contatos minerais ao longo dos planos que definem a estrutura orientada da rocha são discretamente côncavo-convexos a planares, indicando certa descontinuidade física segundo posições paralelas aos planos de maior estiramento mineral.

Figura 4.2 – Amostra de um ladrilho do “granito” Ouro Brasil.

4.1.2 RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO (MÉTODO AMSLER)

É determinada segundo a norma NBR 12642 (ABNT, 1992h).

Na Tabela 4.1 são apresentados os valores de resistência ao desgaste abrasivo obtidos para o “granito” *Desert Storm* e Ouro Brasil.

Tabela 4.1 Resultados dos ensaios de resistência ao desgaste abrasivo (Método Amsler).

Material	C.P.	Leituras	Desgaste (mm) correspondente ao percurso:					
			500m		1000m			
			Individual	Média	Individual	Média	Desvio Padrão	Coef. Var.
<i>Desert Storm</i>	DS 1	1	0,33	0,375	0,84	0,878	0,08	0,10
		2	0,35		0,88			
		3	0,50		1,00			
		4	0,46		0,97			
	DS 2	1	0,26		0,76			
		2	0,32		0,78			
		3	0,43		0,92			
		4	0,35		0,87			
Ouro Brasil	OB 1	1	0,122	0,321	0,72	0,793	0,08	0,10
		2	0,36		0,88			
		3	0,49		0,79			
		4	0,34		0,65			
	OB 2	1	0,47		0,84			
		2	0,40		0,83			
		3	0,13		0,78			
		4	0,26		0,85			

4.1.3 ABRASÃO PROFUNDA

Para a determinação da abrasão profunda, foram utilizados 2 corpos-de-prova de cada rocha estudada. O ensaio foi realizado conforme as diretrizes do Anexo E da norma NBR 13818 (ABNT, 1997)

Cada amostra foi desgastada em dois locais posicionados ortogonalmente (Figura 4.3).

Figura 4.3 Amostra do “granito” Ouro Brasil após o ensaio onde 1 e 2 representam as duas cavidades deixadas pelo desgaste do disco.

Os valores médios da resistência à abrasão profunda das duas rochas estudadas são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Resultados do ensaio de abrasão profunda.

Material	CP	Posição	Comprimento da cavidade		Volume da cavidade (mm ³)			
			Individual	Média	Individual	Média	Desvio Padrão	Coef. Var.
<i>Desert Storm</i>	DS 1	1	35,6	36,2	389,3	412,3	63,2	0,15
		2	35,2		376,2			
	DS 2	1	35,2		376,9			
		2	38,7		506,6			
Ouro Brasil	OB 1	1	21,2	24,1	75,8	118,2	49,5	0,42
		2	21,1		74,8			
	OB 2	1	26,9		160,4			
		2	27,0		161,8			

4.1.4 COMPRESSÃO UNIAXIAL

A resistência a compressão uniaxial foi determinada com base na norma da NBR 12767 (ABNT, 1992e) no estado seco. Para o “granito” Ouro Brasil foram utilizados 6 corpos-de-prova (3 perpendiculares e 3 paralelos a estrutura). No que se refere ao “granito” *Desert*

Storm devido a sua heterogeneidade em lavra, foram ensaiados 9 corpos-de-prova (3 perpendiculares, 3 paralelos e 3 inclinados a estrutura).

Na Tabela 4.3 são apresentados os valores da resistência a compressão uniaxial.

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de compressão Uniaxial.

Material	CP	Área (cm ²)	Força (kN)	Tensão de Ruptura (MPa)			
				Individual	Média	Desvio Padrão	Coef. Var.
<i>Desert Storm</i>	DS 1.1	44,27	823,00	185,79	169,70	31,04	0,18
	DS 1.2	44,27	593,20	133,92			
	DS 1.3	44,27	838,90	189,38			
	DS 2.1	44,27	486,60	109,85	118,08	7,77	0,07
	DS 2.2	44,27	555,00	125,29			
	DS 2.3	44,27	527,50	119,08			
	DS 3.1	44,27	470,40	106,19	122,36	14,11	0,12
	DS 3.2	44,27	585,60	132,20			
	DS 3.3	44,27	570,10	128,70			
Ouro Brasil	OB.1	43,57	500,40	114,79	114,43	8,47	0,07
	OB.2	43,57	461,10	105,78			
	OB.3	43,57	534,90	122,71			
	OB.4	43,57	519,70	119,22	118,44	1,60	0,01
	OB.5	43,57	508,30	116,61			
	OB.6	43,57	520,90	119,50			

LEGENDA:

DS 1.1, DS 1.2 e DS 1.3 – Corpos-de-prova com planos paralelos;

DS 2.1, DS 2.2 e DS 2.3 – Corpos-de-prova com planos oblíquos;

DS 3.1, DS 3.2 e DS 3.3 – Corpos-de-prova com planos perpendiculares;

OB.1, OB.2 e OB.3 – Corpos-de-prova com planos paralelos;

OB.4, OB.5 e OB.6 – Corpos-de-prova com planos perpendiculares.

4.1.5 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS (Vp)

A norma adotada para este ensaio foi a ASTM D 2845, visto ainda não existir norma brasileira.

Este ensaio foi realizado em todos os corpos-de-prova destinados ao ensaio de compressão uniaxial, sempre na condição seca.

A Tabela 4.4 apresenta os resultados das determinações da velocidade de ondas ultra-sônicas longitudinais (Vp).

Tabela 4.4 - Resultados da determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas.

Material	CP	Velocidade (m/s)			
		Individual	Média	Desvio Padrão	Coef. Var.
<i>Desert Storm</i>	DS 1.1	5502	5234	394,65	0,075
	DS 1.2	4781			
	DS 1.3	5419			
	DS 2.1	5139	5333	285,87	0,054
	DS 2.2	5199			
	DS 2.3	5661			
	DS 3.1	4446	4683	238,20	0,051
	DS 3.2	4680			
	DS 3.3	4923			
Ouro Brasil	OB 1	4517	4546	26,32	0,006
	OB 2	4569			
	OB 3	4551			
	OB 4	4762	4604	184,85	0,040
	OB 5	4650			
	OB 6	4401			

LEGENDA:

DS 1.1, DS 1.2 e DS 1.3 – Corpos-de-prova com planos paralelos;

DS 2.1, DS 2.2 e DS 2.3 – Corpos-de-prova com planos oblíquos;

DS 3.1, DS 3.2 e DS 3.3 – Corpos-de-prova com planos perpendiculares;

OB.1, OB.2 e OB.3 – Corpos-de-prova com planos paralelos;

OB.4, OB.5 e OB.6 – Corpos-de-prova com planos perpendiculares.

4.1.6 ÍNDICES FÍSICOS

A determinação da massa específica aparente seca, porosidade aparente e absorção d'água foram obtidas com base na norma NBR 12766 (ABNT, 1992b).

A Tabela 4.5 apresenta os valores obtidos de índices físicos para as rochas estudadas.

Tabela 4.5 Resultados obtidos de índices físicos

Material	CP	M.E.A.S. (kg/m ³)	Porosidade (%)	Abs. d'água (%)
<i>Desert Storm</i>	1	2,594	1,68	0,65
	2	2,626	1,33	0,51
	3	2,617	1,29	0,49
	4	2,564	2,08	0,81
	5	2,608	1,38	0,53
	6	2,557	2,13	0,83
	7	2,594	1,38	0,53
	8	2,585	1,87	0,73
	9	2,629	1,21	0,46
	10	2,592	1,39	0,54
Média =		2,597	1,57	0,61
Desv. Padrão =		0,024	0,342	0,138
Coef. Var. =		0,009	0,218	0,227
Ouro Brasil	1	2,617	1,26	0,48
	2	2,615	1,40	0,54
	3	2,622	1,17	0,44
	4	2,611	1,15	0,44
	5	2,608	1,39	0,53
	6	2,610	1,18	0,45
	7	2,651	1,31	0,49
	8	2,612	1,36	0,52
	9	2,618	1,00	0,38
	10	2,617	1,01	0,38
Média =		2,618	1,22	0,47
Desv. Padrão =		0,012	0,150	0,060
Coef. Var. =		0,005	0,120	0,120

LEGENDA:

MEAS – Massa específica aparente seca.

4.2 ANÁLISE DE IMAGENS DAS PÉROLAS DIAMANTADAS

As imagens digitais das superfícies das pérolas permitiram fazer uma identificação preliminar de possíveis vestígios que refletem condições operacionais específicas.

As Figura 4.6, 4.7 e 4.8 mostram três fases distintas de desgaste em situações operacionais diferentes. Além disso é possível ainda observar a existência de locais de grande concentração de diamantes e regiões bem marcadas onde a sua presença é diminuta, independente da marca dos fios.

Figura 4.4 – Pérola diamantada onde é possível observar as arestas dos diamantes assim como o aparecimento de novos diamantes.

Figura 4.5 – Pérola na sua fase final de utilização com um desgaste uniforme.

Figura 4.6 - Pérola na sua fase final de utilização com um desgaste irregular.

4.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os “granitos” Desert Storm e Ouro Brasil no ensaio de desgaste Amsler apresentaram valores muito próximos. Segundo a norma NBR 13818 (ABNT, 1997b) o desgaste obtido é em muito superior ao recomendado ($<0,4$) que seria o indicado para condições normais de uso como tráfego de pedestres.

Os valores médios da resistência à abrasão profunda mostrados na tabela 4.2 indicam que os volumes de material desgastado no Ouro Brasil ($118,2\text{mm}^3$) atendem à exigência da norma NBR 13818, posto ser mais duro, o que não se verifica para o *Desert Storm* ($412,3\text{mm}^3$). O resultado do ensaio vai de encontro com o observado no corte em pedreira, onde a velocidade de corte média utilizada para o *Desert Storm* (24 m/s) é maior do que a do Ouro Brasil (22,5 m/s).

Conforme a tabela 4.3 observa-se uma maior dispersão dos valores da tensão de ruptura no material *Desert Storm*, e que os valores mais elevados ocorreram nos corpos-de-prova com planos perpendiculares à foliação

Como era de se esperar, a análise dos dados apresentados nas tabelas 4.3 e 4.4 mostra uma clara relação entre as resistências a compressão uniaxial (RCU) e a velocidade de propagação de ondas (V_p) onde se pode observar que o material com menor dispersão na RCU é o mais homogêneo na V_p .

A análise conjunta dos resultados obtidos nos ensaios corrobora o esperado, já que o material mais duro (Ouro Brasil) é o mais homogêneo, o de menor dispersão e menor absorção.

Os resultados obtidos na captação de imagens das pérolas diamantadas permitem constatar, que as amostras de fio coletadas em condições operacionais onde a velocidade de corte era baixa, a existência em abundância de diamantes bastante proeminentes e afiados.

Este resultado leva a uma menor eficiência do fio diamantado e o que acarreta valores de custo maior.

Na figura 4.5 mostra-se uma pérola na sua fase final de utilização onde é possível observa-se que quando os procedimentos são executados de uma forma adequada a pérola é desgastada uniformemente.

5 PROBLEMAS NO PROCESSO DE CORTE COM FIO DIAMANTADO

O acompanhamento efetuado nas pedreiras estudadas permitiu constatar a existência de alguns problemas oriundos da utilização incorreta do fio diamantado. Para o seu bom funcionamento, no tocante à qualidade do corte e à vida útil, é necessário observar alguns cuidados no seu manuseio que vão desde a colocação do fio nas polias e na máquina operadora até o controle dos parâmetros operacionais (velocidade, amperagem, etc.). Quando tais procedimentos não são realizados com a devida atenção, algumas anomalias podem ocorrer tanto em relação ao rendimento do corte, quanto ao excesso de tensão que será solicitado da máquina. Em outras palavras, o sistema de corte (fio/máquina) não estará operando nas condições ideais. Em relação ao fio propriamente dito, alguns “sinais” refletem problemas que podem ser observados por uma simples análise visual, como o ângulo de abertura entre o fio e a polia da máquina, a ovalização das pérolas, a execução de emendas, o “efeito cometa” e a diminuição do espaçamento entre pérolas diamantadas.

5.1 ÂNGULO DE ABERTURA

O ângulo de abertura (α) é formado pelo fio diamantado que sai da parte superior do maciço até a polia que se encontra na máquina de corte e o plano horizontal (Figura 5.1).

Figura 5.1 – Esquema elucidativo de um corte em rocha granítica, onde é indicado o ângulo de abertura.

A execução de um corte, seja ele vertical ou horizontal, requer alguns utensílios complementares. No caso do corte vertical é necessária uma polia na parte superior da bancada para que o ângulo de abertura seja o mais aberto possível. Em algumas pedreiras a colocação da polia é feita por meio de uma torre, assim o fio fica distanciado da face de corte a uma altura superior à da bancada em aproximadamente 50 cm. Esta polia é habitualmente retirada quando o corte está prestes a surgir na face mais externa, como foi observado na maioria das pedreiras visitadas. Este fato leva a uma diminuição do ângulo de abertura, o que implica em um maior contato das pérolas com as bordas do corte e maior tensão no fio, o que provoca um desgaste elevado. É sempre possível verificar a forma como foi realizado o corte, para isso basta observar as marcas deixadas na rocha pelo fio diamantado.

Na Figura 5.2 são observadas duas faces verticais de uma mesma pedreira do “granito” Ouro Brasil, nas quais a abertura do fio foi mantida de forma diferente. No lado esquerdo (a) a

polia foi retirada no final do corte, enquanto que no lado direito (b) a polia foi mantida até a finalização do corte.

(a)

(b)

Figura 5.2 – Duas situações diferentes de corte vertical: (a) a polia foi retirada antes do término do corte, (b) a polia se manteve até ao fim do corte. A linha tracejada indica as feições deixadas pelo fio diamantado.

5.2 “OVALIZAÇÃO”

A ovalização é uma deformação que ocorre na pérola resultante de um desgaste diferencial (Figura 5.3). Em condições operacionais ideais, o desgaste das pérolas se processa de modo uniforme como é mostrado na figura 5.4. O efeito de ovalização ocorre, essencialmente, quando durante o corte, uma determinada região das pérolas é mantida por mais tempo em contato com a rocha. Tal fato acarreta um rendimento baixo do fio e, em casos extremos, impossibilita a sua utilização.

Figura 5.3– Aspecto de um fio diamantado com feições de “ovalização”. Notar o detalhe do desgaste diferencial da pérola e a exposição do cabo de aço (B).

Figura 5.4 – Fio diamantado desgastado homogeneamente, sem feições de ovalização, retirado da pedreira que explora o “*Desert Storm*”.

Para minimizar o problema deve-se aplicar torções ao fio, que variam entre 1,5 a 2,0 voltas/metro, de acordo com a recomendação do fabricante. É importante seguir a recomendação do fabricante, porque nem todos os fios se comportam da mesma forma e muitos não permitem a torção nos dois sentidos, assim como o número de voltas aplicado por metro é variável.

Foi observado que a torção permite que o fio desenvolva um movimento helicoidal sobre seu próprio eixo, fazendo com que as pérolas girem e o desgaste seja consequentemente, o mais uniforme possível.

Constatou-se que nem sempre a torção aplicada é suficiente e adequada à melhor performance do fio. Este fato faz com que seja necessário executar paradas periódicas durante o corte (Figura 5.5), para observação do fio e se existirem problemas, realizar correções com acréscimos de, aproximadamente, 0,2 voltas/metro, em relação à torção inicialmente dada.

Figura 5.5 – Controle do desgaste do fio no decorrer de um corte vertical.

5.3 EXECUÇÃO DE EMENDAS

Antes de dar início ao corte é efetuada a ligação das duas extremidades (emenda) do cabo de aço pela aplicação de um tubo metálico (engaste), para que o circuito fique fechado e pronto para ser colocado nas polias.

A operação da emenda consiste na retirada do material protetor (borracha ou plástico) nas duas extremidades do fio, as quais são lixadas para melhor aderência com o elemento de engaste (Figura 5.6 a). Com o auxílio de uma prensa, procede-se o aperto do engaste, tendo-se

o cuidado de girar o fio para que ele seja uniforme e não permaneçam arestas salientes que possam se prender na rocha durante o corte.

(a)

(b)

Figura 5.6 – Execução de emenda num fio diamantado.

Quando a emenda não é bem feita, quer pela retirada excessiva do material protetor ou então por um aperto insuficiente, os contatos do engaste com o fio ficam espaçados podendo, desta forma, acumular uma pasta (partículas de pó mais água) que desgasta o cabo. Nestas condições, em fios com várias emendas e com algum tempo de uso pode ocorrer ruptura decorrente do desgaste nos contatos. Sob este aspecto, foram constatados casos que machucaram, aleijaram e até ceifaram vidas de trabalhadores como resultado da ruptura brusca do fio diamantado.

Numa das pedreiras visitadas verificou-se rupturas de alguns fios diamantados, que provocaram a diminuição do rendimento, a perda de parte do fio e problemas graves com relação à de segurança dos operadores.

As emendas, mesmo quando bem realizadas devem ser alvo de observação periódica, visto que após determinado tempo de corte, as pérolas a elas adjacentes apresentam desgaste diferencial. Quando tal fato ocorre, recomenda-se a troca dos engastes e, sempre que necessário, nova torção no fio diamantado.

Na Figura 5.7 são apresentadas emendas de fios utilizados em cortes de granito em pedreiras de diferentes empresas. No engaste em (a) observam-se os espaçamentos resultantes de uma emenda mal realizada agravada pelo tensionamento do fio durante o corte, enquanto que em (b) a emenda ocupa todo o espaço entre as pérolas sendo esta a forma correta de se executá-la.

Figura 5.7 – Exemplos de emendas realizadas em fios diamantados.

5.4 “EFEITO COMETA”

A observação cuidadosa do fio em operação pode mostrar se as pérolas já desgastadas apresentam o efeito que lembra um “cometa”. Para uma melhor compreensão desse efeito, foi recolhida uma amostra de fio diamantado após ele ter cortado aproximadamente 525 m². A Figura 5.8 mostra os diamantes desse fio, observado sob aumento de 50x, onde se observa a configuração de um núcleo e uma cauda (semelhante a um cometa) que reflete uma saliência da liga metálica não desgastada. Quando o rastro é muito pronunciado indica má utilização do

fio, fato que pode provocar quebra dos diamantes e, conseqüentemente, a diminuição da sua vida útil.

Figura 5.8 – Ampliação de 50 x de uma pérola que apresenta efeito cometa. Fio utilizado numa pedreira do granito “Ouro Brasil”.

Este efeito é resultante da velocidade periférica se encontrar abaixo da ideal. O valor adequado da velocidade varia entre 24 m/s a 29m/s, dependendo das características do material a ser cortado. Às vezes a velocidade é mantida por horas em um intervalo de 18 m/s a 24 m/s, portanto abaixo da “recomendada” e dessa forma, as pérolas têm um maior contato com a rocha, o que implica uma maior vibração do fio, fato esse que provoca a quebra acentuada dos diamantes.

Para que se consiga obter a velocidade adequada em função do tipo de rocha, deve-se ter um bom conhecimento dos insumos e dos equipamentos, os quais variam de acordo com os fabricantes. Além disso deve ser mantido, o sentido de corte de um determinado fio diamantado, não sendo aconselhável a sua inversão porque os diamantes ficam “descalçados”

facilitando, conseqüentemente, o seu arrancamento. Na maioria dos fios diamantados este sentido é dado por uma seta, como é mostrado na Figura 5.9.

Figura 5.9 – Seta indicativa do sentido de corte.

5.5 DIMINUIÇÃO DO ESPAÇAMENTO ENTRE AS PÉROLAS DIAMANTADAS

Dentre os aspectos que causam problemas no fio diamantado deve ser, considerado também a diminuição do espaçamento entre as pérolas, efeito que na prática é chamado de “churrasquinho” (Figura 5.10). Ele ocorre principalmente nos fios plastificados, porque são os mais susceptíveis ao calor gerado pelo atrito durante a operação de corte. A refrigeração do cabo diamantado é essencial para se obter um bom corte. Se o fluxo de água for insuficiente desenvolve-se um aquecimento anormal do fio, em particular da proteção (plástico e borracha) do cabo de aço. Esse aquecimento torna o plástico mais compressível, provocando a diminuição do espaçamento entre as pérolas. No acompanhamento de vários cortes constatou-se que o volume de água usado para a refrigeração é obtido de forma empírica e varia de operador para operador.

Uma outra forma de manifestação do efeito “churrasquinho” pode ser observada mais frequentemente em maciços fraturados. Ele ocorre quando uma pérola diamantada ou uma emenda fica presa numa fratura, resultando em um inchamento do material protetor e, por consequência, uma redução do espaçamento entre pérolas.

Figura 5.10 – (a) efeito “churrasquinho” num trecho de um fio diamantado. (b) ampliação do efeito em 3 x.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A lavra de granitos ornamentais com fio diamantado apresenta as seguintes vantagens em relação às outras técnicas extrativas: economia de tempo, menor custo operacional, maior regularidade do corte e menor impacto ambiental, principalmente no que diz respeito à produção de ruídos e de poeiras.

Não obstante a utilização do fio diamantado apresentar estas vantagens existem, em contrapartida, determinadas condições que inviabilizam o seu uso. Essas condições podem ser de cunho geoestrutural e/ou geomorfológico. O fraturamento intenso dos maciços rochosos é empecilho para a utilização do fio diamantado. Outro impedimento diz respeito às características topográficas que, quando muito acidentadas, não permitem a instalação de máquinas. Estas duas situações ocorrem em determinadas regiões de Portugal país que, mesmo sendo muito desenvolvido quanto à exploração de granitos, não pode lançar mão de todas as técnicas disponíveis.

Por outro lado o Brasil, face à grande variabilidade de rochas explotáveis e condições geológico-geomorfológicas favoráveis, tornou-se um pólo atrativo para as indústrias internacionais produtoras de máquinas e insumos para lavra de rochas ornamentais. Com o

passar do tempo, o parque industrial nacional se modernizou e, atualmente, é grande produtor e exportador destas máquinas.

Os ensaios tecnológicos executados, aliados a observações de campo, permitem que sejam feitas algumas considerações e sugestões.

De forma geral, tanto a análise petrográfica quanto o ensaio de compressão uniaxial são fundamentais, pois além de fornecerem dados absolutos, permitem inferências sobre outras propriedades dos “granitos” e são excelentes para a triagem inicial.

Os ensaios da resistência à abrasão profunda indicaram que os volumes de material desgastado no *Desert Storm* são mais elevados do que no Ouro Brasil. Assim sendo constata-se que o “granito” Ouro Brasil apresenta maior “dureza” do que o *Desert Storm*. O que vai ao encontro com o que foi observado na pedreira onde é explotado o material *Desert Storm*: dificuldades em “afiar” os diamantes do fio diamantado o que leva a se recorrer a outro material como o Ouro Brasil para se conseguir a afiação. A velocidade média utilizada para cortar o *Desert Storm* é de 24 (m/s) e no Ouro Brasil de 22,5 (m/s) o que esta de acordo com os valores obtidos nos ensaios. Já os ensaios para a determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas (V_p) permitem uma relação direta com os resultados de compressão uniaxial (RCU) onde foi observado que o material com menor dispersão na RCU é o mais homogêneo na V_p .

Por outro lado, na pedreira onde se explora o “granito” Ouro Brasil, o acompanhamento de cortes possibilitou verificar que estruturas orientadas, do tipo gnáissica e o estado de tensões internas, facilitam a formação de “embarrigamentos” no maciço rochoso, por direcionarem o fio diamantado ao longo destas estruturas e pelo alívio das referidas tensões. O mesmo não ocorre no “granito” *Desert Storm* visto o alívio de tensões se ter dado antes do corte.

Essas considerações, por se referirem aos dois “granitos” estudados não permitem que correlações sejam formuladas com confiabilidade estatística, entretanto tal condição poderá ser atingida pelo estudo de um número maior de “granitos”.

Os problemas apresentados com relação ao uso de fio diamantado, são reflexos da falta de conhecimento do processo e/ou do treinamento de pessoal, bem como do desconhecimento das interações existentes entre a máquina, o abrasivo e a rocha. Os principais problemas observados foram os seguintes: desgaste diferencial das pérolas (ovalização), quebra dos diamantes e a diminuição do ângulo de abertura entre o fio e a polia da máquina. Tais problemas podem ser minimizados e, até evitados, quando conjuntamente são observados os seguintes procedimentos:

- ✓ Utilização das polias guias alinhadas e até ao fim do corte;
- ✓ Aplicação de torções em número adequado no fio;
- ✓ Execução cuidadosa das emendas e observação contínua;
- ✓ Conhecimento das características petrográficas da rocha para estabelecer a velocidade ideal de corte;
- ✓ Cuidado redobrado em maciços fraturados ou materiais heterogêneos.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O acompanhamento em pedreiras do corte com fio diamantado é um fator importante para a constatação de diversas anomalias. A utilização de planilhas com todos os dados do processo de corte possibilitará um estudo comparativo para vários tipos de “granitos” ornamentais considerando as variáveis envolvidas (velocidade, amperagem, torque, deslocamento da máquina).

O acompanhamento de cortes verticais e horizontais visando correlacioná-los com os planos de foliação da rocha e com o estado de tensões do maciço rochoso poderá fornecer informações relevantes que permitam evitar o fenômeno conhecido por “embarrigamento”.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUS, M.; BORTOLUSSI, A.; CICCUCI, R. (1996). Abrasive-rock interaction in AWJ cutting. Gee C (ed) 1996 Jetting Technol., Mechan. Engng. Publ., London. p. 509-520.
- AGUS, M.; BORTOLUSSI, A.; CICCUCI, R. (1995). Abrasive performance in rock cutting with AWJ and ASJ. In: LABUS, T. J. eds. Proc. 8th Amer. Water Jet Conf., Water Jet Techn.Ass., St. Louis. p. 31-48.
- ALENCAR, C.R.A.; CARANASSIOS, A.; CARVALHO, D.L.C. (1996). Estudo econômico sobre rochas ornamentais. Tecnologias de lavra e beneficiamento de rochas ornamentais. Fortaleza, IEL/FIEC. v.3. 225p.
- ALMEIDA, S.L.M.; CHAVES, A.P. (2002). Aproveitamento de rejeito de pedreiras de Santo Antônio de Pádua – RJ. Rio Janeiro: CETEM/MCT. 35p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM (1990). Standard Test Method for Laboratory: Determination of Pulse Ultrasonic Elastic Constants of Rocks. 5p. (standard D-2845).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS - ABIROCHAS (2001). Rochas Ornamentais no Século XXI – Bases para uma política de desenvolvimento sustentado das exportações brasileiras. Coordenador: Peiter et al. Rio de Janeiro/ABIROCHAS. 160p.

_____ - (2006a). Balanço das exportações brasileiras de rochas ornamentais em 2005. Disponível em: <[http:// www.abirochas.com.br](http://www.abirochas.com.br)>. Acesso em 07/06/2006.

_____ - (2006b). Balanço das exportações e importações brasileiras de rochas ornamentais no 1º quadrimestre de 2006. Disponível em: <[http:// www.abirochas.com.br](http://www.abirochas.com.br)>. Acesso em 07/06/2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1992a). NBR 12768: Rochas para revestimento – Análise petrográfica. Rio de Janeiro. 2p.

_____ - (1992b). NBR 12766: Rochas para revestimento – Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água. Rio de Janeiro. 2p.

_____ - (1992c). NBR 12763: Rochas para revestimento – Determinação da resistência à flexão. Rio de Janeiro. 3p.

_____ - (1992d). NBR 12764: Rochas para revestimento. Determinação da resistência ao impacto de corpo duro. Rio de Janeiro. 2p.

_____ - (1992e). NBR 12767: Rochas para revestimento. Determinação da resistência a compressão uniaxial. Rio de Janeiro. 2p.

_____ - (1992f). NBR 12765: Rochas para revestimento. Determinação do coeficiente de dilatação térmica linear. Rio de Janeiro. 3p.

_____ - (1992g). NBR 12769: Rochas para revestimento. Ensaio de congelamento e degelo conjugado a verificação da resistência à compressão uniaxial. Rio de Janeiro. 2p.

_____ - (1992h). NBR 12642: Rochas para revestimento. Determinação do desgaste por abrasão. Rio de Janeiro. 3p.

_____ - (1992i). NBR 10341: Rochas para revestimento. Determinação do módulo de deformabilidade estática. Rio de Janeiro. 3p.

- _____ - (1997). NBR 13818: Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaio. Anexo E. Determinação da resistência à abrasão profunda. Rio de Janeiro. 3p.
- BORTOLUSSI, A. *et al.* (1988). Improved technology and planning in modern stone quarrying. Symposium on mine planning and equipment selection. Balkema. Anais. Rotterdam. p. 107-119p.
- BORTOLUSSI, A. *et al.* (1989). Escavazione e preparazione du blocchi di granite. Marmi Graniti. Pietre. Carrara, n. 162. p. 17-33.
- CAPUZZI, Q. (1988). Moderne technology and machinery for quarry. Benetti Macchine. SRI. Carrara. 95p.
- CARANASSIOS, A. (1993). Applicazione di tecnologie avanzate per il taglio del granito. Tesi (dottorato) - Università Degli Studi di Cagliari. Cagliari. 368p.
- CARANASSIOS, A.; PINHEIRO, J.R. (2004). O emprego do fio diamantado na extração de rochas ornamentais: curso básico para operadores. Cachoeiro de Itapemirim. CETEMAG. 25p.
- CENTRO TECNOLÓGICO DO MÁRMORE E GRANITO (2003). Curso de polidor. Apostila. 21p.
- CHIODI FILHO, C. (2004). Consumo interno, perfil de utilização e estrutura de comercialização das rochas no Brasil. Pedras do Brasil. Nº 25. p. 36-40.
- CICCU, R. (1989). Coltivazione e valorizzazione dei lapidei silicei quarrying and processing of eruptive rocks. Atti delle giornate di studio. Convegno internazionale su: Situazione e prospettive dell' industria lapidea. A.N.I.M. Cagliari. Anais. p. 165-177.
- COELHO, A. A. M.; VIDAL, F.W.H. (2003). Métodos e tecnologias de lavra para a melhoria da qualidade e produtividade dos blocos de granito no Ceará. IV Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste. Fortaleza. CE. 1 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.
- DIAMANT-BOART (2005). Cabos diamantados para industria da pedra. 20p. Disponível em: <http://www.diamant-boart.com/pdf/cables_PO.pdf>. Acesso em 29/04/2005.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PESQUISAS MINERAIS. ANUÁRIO MINERAL BRASILEIRO. DNPM (1996). Disponível em <<http://www.dnpm.gov.br/97911.doc>>. Acesso em 30/11/2005.
- DANESI, R. (1997). Evolução tecnológica aumenta a produção de mármore e granitos. Revista Rochas de Qualidade. Ano XXVI. edição 132 (Jan/Fev). 70p.
- FRASCÁ, M. H. B. O.; SARTORI, P. L. P. (1998) . Minerais e rochas. In: OLIVEIRA, M. A. S; BRITO, S. N. A. eds. Geologia de Engenharia. São Paulo. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. Cap.2, p. 15-38.
- FRAZÃO, E. B. (2002). Tecnologia de rochas na construção civil. São Paulo. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. p. 132.
- FRAZÃO, E. B.; PARAGUASSU, A. B. (1998) . Materiais rochosos para construção. In: OLIVEIRA, M. A. S; BRITO, S. N. A. eds. Geologia de Engenharia. São Paulo. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. Cap.20, p. 331-342.
- IMPrensa, (2005). Máquina de Fio Diamantado com maior produção e menor desgaste do fio diamantado. Disponível em < <http://www.marble.com.br/article/articleview/1034/1/47/>>. Acesso em 10/05/2005.
- MACHADO, F. B.; MOREIRA, C.A.; ZANARDO, A.; ANDRE, A.C.; GODOY, A.M.; FERREIRA, J.A.; GALEMBECK, T.; NARDY, A.J.R; ARTUR, A.C.; OLIVEIRA, M.A.F. (2003). Enciclopédia Multimídia de minerais e atlas de rochas. Disponível em <<http://www.rc.unesp.br/museudpm>>. Acesso em 15/04/2005.

- 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.
- MARINI QUARRIES GROUP, (2005). La tecnologia del filo diamantato. 16p. Disponível em <<http://www.mariniqg.it/port/flashsite/index.html>>. Acesso em 12/04/2005.
- MENDES, V. A. (2002). Os jazimentos de rochas ornamentais e sua relação com os eventos tectônicos atuantes no território brasileiro. III Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste. Recife. Pernambuco. 1 CD-ROM.
- MOMBER, A. W. & KOVACEVIC, R. (1998) Principles of Abrasive Water Jet Machining. Ed. Springer. 394p.
- PAULA, J.P. (2005). Concepção e aplicação de um modelo matemático para gerenciamento de cortes com fio diamantado. I Congresso Internacional de Rochas Ornamentais. Guarapari, Espírito Santo. 1 CD-ROM.
- PENSEDMA, (2005). CO.FI.PLAST BRASIL: lançamentos e inovações durante a Feira de Cachoeiro. Disponível em <<http://www.marble.com.br/article/articleview/1324/1/47/>>. Acesso em 12/08/2005.
- PEREIRA, E.B.; ROBERTO, F.A.C.; AMARAL, M. (1997). Estudo econômico sobre rochas ornamentais. Situação atual diagnóstico do setor de rochas ornamentais do nordeste. Fortaleza. v.5. 149p.
- PINHEIRO, J. C. F; BIONDI, J. C.; PINHEIRO, S. O. (1978). Granulitos e/ou charnockitos do Cinturão Granulítico Atlântico maciços de Aimorés, Itapina, Itaguaçu e Itanhomi. IN: XXX Congresso Brasileiro de Geologia. Recife. v.3. p. 1288-1302.
- QUITETE, E. B. (2002). Dureza knoop em rochas para revestimento: metodologia e correlação com desgaste abrasivo. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. USP. 70p.

- QUITETE, E. B. & RODRIGUES, E. P. (1998) Dureza knoop aplicada a rochas ornamentais. Publicação IPT 2561. 4p.
- RABINOWICZ, E. (1966). Friction and Wear of materials. Cambridge, Massachussets, John Wiley. 243 p.
- RIBEIRO, R. P. (2005). Influência das características petrográficas de granitos no processo industrial de desdobramento de blocos. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. USP. São Paulo. 120p.
- STACHOWIAK, G.W.; BATCHELOR, A. W. (1993). Engineering tribology. Amsterdam. Elsevier.
- STEINVARZ, (2005). Disponível em <<http://www..it/html/prodotti.htm>>. Acesso em 10/06/2006.
- STELLIN JÚNIOR, A.; CARANASSIOS, A. (1991). A extração de rochas ornamentais. Brasil Mineral. São Paulo, nº 89. p. 30-34.
- TOMITA, Y.; EDA, H. (1996) – A study of the ultra precision grinding process on a magnetic disk substrate – development of new bonding materials for fixed abrasives of grinding stone. Wear 195. p. 74-80.
- VIDAL, F. W. H. (1999). Estudo dos elementos abrasivos de fios diamantados para lavra de granitos do Ceará. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. USP. 179p.
- ZUM-GAHR, K. H. (1987) – Microstructure and wear of materials. Institute of Materials Technology. University of Siegen, Siegen, Federal Republic of Germany, v.10.