

FRANCISCO WILSON HOLLANDA VIDAL

**ESTUDO DOS ELEMENTOS ABRASIVOS DE FIOS DIAMANTADOS
PARA A LAVRA DE GRANITOS DO CEARÁ**

**Tese Apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título
de Doutor em Engenharia**

**Área de Concentração :
Engenharia Mineral**

**Orientador:
Prof. Dr. Antônio Stellin Júnior**

**São Paulo
1999**

Aos meus pais, minha esposa,
meus filhos, e meus colegas de
trabalho que têm sido a grande
razão e incentivo do meu
aperfeiçoamento técnico. .

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Antônio Stellin Júnior, pela orientação do trabalho e sugestões no decorrer do mesmo.

À direção do CETEM, na pessoa do Professor Dr. Roberto C. Villas Bôas, e da EPUSP, nas pessoas do Professor Dr. Eduardo Camilher Damasceno e do Professor Dr. Arthur Pinto Chaves que envidaram todos os esforços para que o convênio EPUSP/CETEM se concretizasse na realização do curso.

À Secretaria da Ciência e Tecnologia do Estado Ceará, na pessoa do seu Secretário de Governo, engenheiro Francisco Ariosto Holanda e ao NUTEC, na pessoa do Presidente engenheiro João Arquimedes B. Pereira, pelo esforço desempenhado junto ao Governo do Estado do Ceará no sentido de tornar possível a participação no curso de doutorado.

À Universidade de Cagliari, Itália na pessoa do Professor Dr. Raimondo Ciccu pela colaboração do trabalho, amizade, incentivo, sugestões e revisão da pesquisa de laboratório.

A todos aqueles que de alguma maneira colaboraram na execução deste trabalho e em especial:

- ao engenheiro de minas Antonio Vargiu pela ajuda na realização dos ensaios;
- ao geólogo Marco Piras pelo auxílio na realização da pesquisa de laboratório;
- às geólogas Angelica Batista e Fátima Bessa que contribuíram para a realização da pesquisa, discussões, técnicas e revisão dos capítulos;
- ao engenheiro químico Eso Bravo de Moura pela colaboração dada durante a pesquisa bibliográfica e de laboratório, bem como das discussões de resultados obtidos;
- ao geólogo Antonio Helio Muniz pela realização do estudo de caracterização petrográfica e mineralógica das amostras de granito bem como dos elementos abrasivos do fio diamantado;
- à engenheira de minas Lia Fernandes e a técnica de administração Vilaci Fernandes Noronha pela realização dos trabalhos computacionais;
- ao CNPq/RHAE e NUTEC pelos recursos materiais e financeiros para realização deste trabalho.

SUMÁRIO

Lista de tabelas

Lista de figuras

Resumo

“Abstract”

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ESTADO D'ARTE DE EXTRAÇÃO.....	5
2.1 Metodologia de Lavra.....	13
2.1.1 Lavra por bancadas.....	16
2.1.2 Lavra por painéis verticais.....	19
2.1.3 Lavra por desmoroamento.....	20
2.1.4 Lavra seletiva.....	22
2.1.5 Lavra de matacões.....	23
2.1.6 Lavra subterrânea.....	25
2.2 Tecnologia de Lavra.....	27
2.2.1 Tecnologias cíclicas.....	28
2.2.2 Tecnologias de corte contínuo.....	38
2.2.3 Tecnologia avançada de corte.....	47
2.2.4 Aplicação da tecnologia mista.....	76
2.2.5 Critérios de escolha.....	81
2.3 Inovação Tecnológica no Brasil.....	87

Fortaleza – CE , 03 de Fevereiro de 1999

A/C

Sra. Regina Aparecida Freitas da Silva

ASSUNTO: EMENTA DA DEFESA DE TESE DE DOUTORADO

Prezada Senhora,

De acordo com entendimento mantido com a Comissão de Pós-Graduação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo-EPUSP, estou enviando a ERRATA da tese para ser anexada na mesma.

Antecipados agradecimentos,

Atenciosamente,

FRANCISCO WILSON HOLLANDA VIDAL

NO FENIX: 1174128
Defesa 14/02/99

ERRATA

ESTUDO DOS ELEMENTOS ABRASIVOS DE FIOS DIAMANTADOS PARA A LAVRA DE GRANITOS DO CEARÁ
 TESE DE DOUTORADO
 FRANCISCO WILSON HOLLANDA VIDAL

PAG LINHA	onde se lê	leia-se
PAG 02 LINHA 7 e 8	a penalização completa do jazimento	o comprometimento completo do jazimento
PAG 04 LINHA 01	devido à resistência mecânica	devido à abrasividade do material
PAG 05 LINHA 06	montanhas ipuanas	montanhas Apuanas
PAG 08 LINHA 05	pode ser aproveitado no maciço rochoso	podem ser aproveitados no maciço rochoso
PAG 15 LINHA 17	CICCU ⁽⁵⁾ explica	CICCU ⁽⁵⁾ , CARANASSIOS ⁽¹²⁾ e ALENCAR et al ⁽¹³⁾ explicam
PAG 20 LINHA 12	sobre o território	sobre a área
PAG 24 Última linha	após grande remoção de solo	após grande remoção de solo
PAG 25 LINHA 07	na lavra de maciço rochosos	na lavra de maciços rochosos
PAG 27 LINHA 14	os autores ^(5,10,11,12)	os autores ^(5,10,11,12 e 13)
PAG 28 LINHA 16	a técnica de 'orte	a técnica de corte
PAG 32 LINHA 05	fatores geométricos tall	fatores geométricos tal
PAG 34 LINHA 13	no desmonte aparecer	no desmonte parecer
PAG 39 LINHA 11	o emprego de carborundo com elemento cortante	o emprego de carborundum como elemento cortante
PAG 44 LINHA 04	da ordem de UIS\$	da ordem de US\$
PAG 45 LINHA 02	na Bélgica e em França	na Bélgica e na França

PAG 46 TABELA 2.3	Fonte : ACIMM – Associação dos fabricantes de equipamentos	Fonte : ALENCAR <i>et al</i> ⁽¹³⁾
PAG 53 LINHA 05	nas pedreiras de mármore a níveis muito elevado	nas pedreiras de mármore a nível muito elevado
PAG 68 LINHA 06	é aplicável para	é aplicável para
PAG 110 ÚLTIMA LINHA	apresenta luminescência é mais resistente	apresenta brilho é mais resistente
PAG 117 LINHA 15	facilita a ação do corte	facilita a ação do corte
PAG 125 LINHA 06	por órgãos normatizadores	por órgãos normativos
PAG 125 LINHA 07	destacando-se entre os quais	destacando-se entre os mesmos
PAG 131 TABELA 3.2	<ul style="list-style-type: none"> • 2.560,00 n.e. • 0,40 n.e. n.e. n.e. • 131,00 • 10,34 n.e. n.e. 	<ul style="list-style-type: none"> ≥ 2.560,00 n.e. ≤ 0,40 n.e. n.e. n.e. ≥ 131,00 ≥ 10,34 n.e.
PAG 131 TABELA 3.2	<ul style="list-style-type: none"> • 2.550,0 • 1,0 • 0,4 • 4.000 • 12,0 • 1,0 • 100,0 • 10,0 • 30,0 • 0,4 	<ul style="list-style-type: none"> ≥ 2.550,0 ≤ 1,0 ≤ 0,4 ≥ 4.000 ≤ 12,0 ≤ 1,0 ≥ 100,0 ≥ 10,0 ≥ 30,0
PAG 143 PRIMEIRA LINHA	as tensões de contato	a força de contato

3. FUNDAMENTOS CIENTÍFICOS	101
3.1 Propriedades do Diamante	103
3.1.1 Estrutura do diamante.....	103
3.1.2 Morfologia do diamante	108
3.1.3 Propriedades físico-mecânicas	109
3.1.4 Outras propriedades	112
3.2 Principais usos do diamante	113
3.2.1 Joalheria e/ou adorno	114
3.2.2 Ferramenta diamantada	114
3.3 Tecnologia do fio diamantado	116
3.4 Avaliação do elemento abrasivo	118
3.5 Propriedades das rochas	124
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	133
4.1 Jazidas Estudadas.....	134
4.1.1 Pedreira granito Asa Branca.....	134
4.1.2 Pedreira granito Rosa Iracema	135
4.1.3 Pedreira granito Red Symphony	137
4.1.4 Pedreira granito Casa Blanca	139
4.2 Caracterização Tecnológica dos Granitos	140
4.3 Equipamentos de Laboratório.....	141
4.4 Ensaios de Laboratório	144
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	147

6. CONCLUSÕES	162
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	166
ANEXO	

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - PARÂMETROS OPERACIONAIS DE CORTE COM FIO HELICOIDAL NO MÁRMORE	41
TABELA 2.2 - PARÂMETROS TÉCNICOS E OPERACIONAIS DE CORTE COM "FLAME-JET" NOS GRANITOS.	42
TABELA 2.3- PARÂMETROS DE CORTES COM CORTADOR A CORRENTE, DE ACORDO COM SUA DUREZA	46
TABELA 2.4 - CONFRONTO ENTRE OS PARÂMETROS DAS TECNOLOGIAS DE FIO DIAMANTADO E HELICOIDAL PARA MÁRMORES	54
TABELA 2.5- PARÂMETROS TÉCNICOS ENTRE O CORTE COM O FIO DIAMANTADO E "FLAME JET" PARA GRANITOS	55
TABELA 2.6- RESULTADO DO USO DO FIO DIAMANTADO NA LAVRA DE GRANITO, EM DIFERENTES PAÍSES	63

TABELA 2.13 - COMPARAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DAS TECNOLOGIAS EXISTENTES PARA A LAVRA DE GRANITO	86
TABELA 2.14 - VALORES DO USO DO FIO DIAMANTADO NA LAVRA DE GRANITO, EM DIFERENTES PAÍSES	88
TABELA 3.1- NORMAS TÉCNICAS PARA CARACTERIZAÇÃO DE ROCHAS ORNAMENTAIS	126
TABELA 3.2- VALORES ESPECIFICADOS PELA NORMA ASTM E SUGERIDOS NO BRASIL	131
TABELA 5.1 - ANÁLISE QUÍMICA DOS GRANITOS	147
TABELA 5.2 - ANÁLISE PETROGRÁFICA E MINERALÓGICA	148
TABELA 5.3 - CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS GRANITOS	152
TABELA 5.4 - ANÁLISE DE ANÉIS DE PÉROLAS DE FIOS DIAMANTADOS	154

**TABELA 5.5 - ENSAIOS DO GRANITO ASA BRANCA 1 UTILIZANDO O
ELEMENTO ABRASIVO MARCA "CO-FI-PLAST" 155**

**TABELA 5.6 - ENSAIOS DO GRANITO ASA BRANCA 2 UTILIZANDO O
ELEMENTO ABRASIVO MARCA "DIAMOND BOARD 155**

**TABELA 5.7 - ENSAIOS DO GRANITO ASA BRANCA 3 UTILIZANDO O
ELEMENTO ABRASIVO MARCA "CO-FI-PLAST" 155**

**TABELA 5.14 - CONFRONTO DOS PARÂMETROS OBTIDOS COM OS
GRANITOS ESTUDADOS 157**

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 - CURVA DE EQUILÍBRIO ENTRE O DIAMANTE E A GRAFITA	102
FIGURA 3.2 - ILUSTRAÇÃO DA MÁQUINA I DE ENSAIO	120
FIGURA 3.3 - ILUSTRAÇÃO DA MÁQUINA II DE ENSAIO	121
FIGURA 4.1 - FOTOGRAFIA DA MÁQUINA III DE ENSAIO E SEUS COMPONENTES ELETROMECÂNICOS	142
FIGURA 4.2 - FOTOGRAFIA DO DISCO DE ROCHA DE GRANITO E BASTÃO COM ANEL DE PÉROLAS DIAMANTADAS	142
FIGURA 4.3 ELUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DA MAQUINA III DE ENSAIOS, EM DUAS FIGURAS	143
FIGURA 4.4 - ILUSTRAÇÃO DE DETALHES EM ÂNGULOS DIFERENTES DO SISTEMA ELETROMECÂNICO DA MAQUINA III DE ENSAIO	144

FIGURA	5.1- FOTOMICROGRAFIA DO GRANITO ROSA IRACEMA	151
FIGURA	5.2 - FOTOMICROGRAFIA DO GRANITO ASA BRANCA	151
FIGURA	5.8 - PRIMEIRA COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE VELOCIDADE DE CORTE E CONSUMO DAS PÉROLAS OBTIDAS UTILIZANDO OS ELEMENTOS ABRASIVOS DA "CO-FI-PLAST" E " DIAMOND BOARD"	158
FIGURA	5.9 - SEGUNDA COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE VELOCIDADE DE CORTE E CONSUMO DAS PÉROLAS OBTIDAS UTILIZANDO OS ELEMENTOS ABRASIVOS DA "CO-FI-PLAST" E " DIAMOND BOARD"	159
FIGURA	5.13 - COMPORTAMENTO DA VELOCIDADE DE CORTE E DO CONSUMO DO ABRASIVO "CO-FI-PLAST" NOS GRANITOS ESTUDADOS	160

RESUMO

O presente trabalho se propõe a estudar os elementos abrasivos de fios diamantados, fabricados no mercado estrangeiro, visando avaliar a qualidade dos mesmos nos granitos do Ceará.

O tema escolhido está inserido no cenário atual do setor de rochas ornamentais do País na região Nordeste, principalmente no Estado do Ceará, pois a abordagem do assunto é importante sobretudo para pedreiras de granitos que carecem de tecnologia adequada para lavra de maciços rochosos.

Na Itália, em particular a região da Sardenha, a mineração de granito e, principalmente, os estudos de lavra em pedreiras é caracterizado por elevados parâmetros econômicos e produtivos, que colocam o País numa vanguarda do mundo por volume comercial, ocupação e progresso tecnológico. A tecnologia avançada de fio diamantado é utilizada a cerca de quase 10 anos em diversas pedreiras da região da Sardenha, responsável por 10 % da produção mundial.

Para ampliar o conhecimento sobre o tema, nesta tese, fez-se uma análise das bibliografias (Nacionais e Internacionais) disponíveis sobre o assunto. Realizou-se conjuntamente com o levantamento bibliográfico, visitas às pedreiras em atividade produtiva no Ceará, a fim de estabelecer-se parâmetros entre as técnicas recomendadas nas bibliografias consultadas com aquelas, normalmente, utilizadas na lavra de granitos.

Parte da pesquisa em laboratório foi realizada na Universidade de Cagliari, Itália, principalmente, no tocante a avaliação dos elementos abrasivos do fio

diamantado, para utilização na etapa de lavra.

O estudo compreendeu basicamente a coleta, preparação e caracterização dos granitos selecionados, realização dos ensaios de laboratório e cálculo das variáveis operacionais e análise dos resultados.

Os resultados com as amostras de granitos estudadas mostraram a viabilidade técnica do uso do fio diamantado, em pedreiras do Ceará, onde foram obtidos níveis satisfatórios de velocidade de corte e consumo das pérolas diamantadas.

Em função dos resultados obtidos com os quatro granito^p estudados, destaca-se o granito Asa^B branca que permitiu parâmetros operacionais satisfatórios compatível com materiais do mesmo tipo comercial. Neste, identificou-se fio diamantado adequado para rocha em questão onde obteve-se parâmetros de velocidade de corte e consumo dos anéis de pérolas diamantadas compátiveis com o percentual de quartzo do material.

ABSTRACT

The purpose of this work is to study the behavior of beads wearing in wire diamond cutting tools obtained from the foreigner market, been its quality the primary goal in the cutting operation valuation in the Ceará's granites.

The issue makes part of the ornamental stones subject situated in the northeast region of our country mainly in the state of the Ceará, taking into account the importance of the subject in granit caves that need its owun technology fitted to the quarry of the rocky massif. In Italy, particularly in the Sardinian region, the quarring of granites and, mainly, the studies of quarries in cavesis characterized by high economic parameters that are productives, that puts the country in the world vanguard by commercial volume, occupation and technological progress.

To increase the knowledge about the subject, in this work, we made bibliographic analyses (national and foreigners) available about the subject. Bibliographic research, visites in producing caves in the Ceará state, so that to establish parameters among the recommended techniques in the consulted bibliographies with those usually employed in the quarries of the granites. Part of the research was realised in the laboratory at the University of Cagliari in Italy, mainly with respect to the valuation of the wire diamond abrasive elements, in the cave operation utilisation.the wire diamond technology is applied to diferent caves in the Sardinian region, and is responsible for 10% in the world production. Basically the study is the obtention, preparation and the characrerization of of the

selected granites, and the realization of the laboratory testes, valuation and analyses of the results. The results with the studied granites samples demonstrated the technical viability of the diamond wire, where were obtained satisfactory levels of cutting rate and wearing of the diamond beads. As a function of the obtained results with four studied granites, Asa Branca presents the best satisfactory operational parameters, in which we identified the diamond wire as the most fitted for the same rock according to the quartz percentage.

1. INTRODUÇÃO

As rochas ornamentais de um modo geral são divididas comercialmente em dois grandes grupos: “mármore e granitos”, e que, por vezes, não são os termos geológicos corretos, porém tem sido consagrado na indústria do setor um grande número de rochas utilizadas no mercado sem que geologicamente correspondam a uma definição exata das mesmas.

Utilizando o termo mármore são comercializadas todas as rochas carbonatadas quer sejam de origem sedimentar (calcários ou dolomitos), quer sejam de origem metamórfica (mármore propriamente dito). Para o termo granito, são colocados no mercado produtos que representam rochas de composições litológicas bem definidas incluindo uma grande variedade de rochas ígneas e metamórficas, que variam desde granitos propriamente ditos a rochas básicas e ultrabásicas (basaltos, gabros, diabásios, etc.).

A produção mundial da indústria de rochas ornamentais, em 1996, atingiu o montante de 40 milhões de toneladas/ano, movimentando valores da ordem US\$ 6 bilhões/ano destes materiais, onde cerca de 60% são de mármore e 40% de granitos, tendo este último aumentado a produção mundial em 20% nos últimos 20 anos.

Devido ao incremento no uso das rochas ornamentais, as empresas foram obrigadas a elevar seus atuais níveis produtivos e ao mesmo tempo melhorar a qualidade do produto. Assim sendo, os métodos tradicionais de

lavra de blocos tiveram um grande progresso científico industrial, na conversão para métodos com tecnologias avançadas de corte, no que se refere ao aperfeiçoamento e inovação das técnicas e equipamentos utilizados nessa atividade, além da crescente preocupação com a proteção do meio ambiente.

Dentre os métodos de tecnologia avançada para lavra, no maciço rochoso, destaca-se os que empregam elementos diamantados que tem permitido: melhor qualidade final do produto; melhor geometria no corte; maior rapidez e menor intensidade do nível de ruído, vibração e poeira em relação a outros métodos tradicionais e elevados níveis de produtividade e competitividade econômica em relação às demais tecnologias avançadas. Outro reflexo positivo da aplicação dessa tecnologia de lavra é a redução dos impactos ambientais gerados na área de influência funcional das pedreiras, uma vez que diminui sensivelmente a formação de rejeitos.

A tecnologia de corte com fio diamantado é largamente difundida na Itália para lavra de rochas ornamentais em maciço, com grande predominância para os mármore. Atualmente, o fio diamantado representa a solução consagrada para as rochas carbonatadas (mármore). Por outro lado, para as rochas silicatadas (granitos) sua utilização não ocorre tão facilmente, devido ao alto grau de abrasividade desses tipos de materiais.

As técnicas atualmente empregadas no Brasil para extração de rochas do tipo graníticas mostram-se, de certa forma, rudimentares, levando a uma perda considerável que, nos casos mais desfavoráveis, atinge até 70% do

volume bruto, seja pela efetiva danificação do material, seja pelos defeitos de forma e irregularidades das faces do bloco, com uma correspondente perda de valor econômico tanto maior quanto mais valioso for o material.

Vale salientar que a introdução indiscriminada de técnicas adotadas em outros países, como por exemplo, o uso de cordel detonante, “flame-jet” ou mesmo o fio diamantado, sem estudo prévio da jazida, estão acarretando no Brasil, danos gravíssimos aos produtores que em alguns casos já tiveram a penalização completa do jazimento porque muitas vezes as rochas possuem características geológicas bastante diferenciadas das rochas européias. A tecnologia de fio diamantado evita o surgimento de fraturas provocadas pelo uso de explosivos, muito comum nos granitos sensíveis aos efeitos de detonação, porém não evita as fraturas provocadas por tensões de alívio. Neste caso, é muito comum se verificar problemas de fraturamento na jazida com muito maior intensidade, devido a influência do estado de tensões do maciço, que pode, em função da quantidade de energia por elas acumulada, apresentar trincas e fissuras no material como consequência do alívio destas tensões que, em última instância, será sempre proporcionado pela lavra.

No Nordeste existe uma grande variedade de tipos de rochas subdividas por classes em função das características de composição mineralógica e petrográfica, bem como dos seus índices físicos e mecânicos. Particularmente existem alguns depósitos graníticos constituídos de rochas metamórficas que apresentam características geológicas e físico-mecânicas muito peculiares. O emprego da tecnologia de corte com fio diamantado representa uma solução

inovadora para esses granitos, porém as tensões de alívio no maciço tem influenciado o seu sistema produtivo, levando em alguns casos a uma redução significativa na recuperação da lavra.

Para se implantar a tecnologia de fio diamantado são necessários, também, inicialmente estudos geológicos visando conhecer as características da jazida (mármore ou granito). Escolhida a tecnologia de fio diamantado como sendo a melhor opção, o passo seguinte é estudar o comportamento da rocha em contato com o elemento abrasivo diamantado do fio (anel de pérolas diamantadas), para posteriormente indicar o fio mais adequado ao aproveitamento técnico-econômico da mina.

Dessa forma é importante observar que o estudo da rocha com o fio diamantado para ser realizado na mina, em frente de lavra, requer a utilização de pelo menos 40 m de fio diamantado a um custo médio de US\$ 250.00/m o que equivale a um total de US\$ 10,000.00 (dez mil dólares) além da mobilização de equipamentos e pessoal operacional de produção. Vale ressaltar, também, que as empresas que fabricam fios diamantados não têm capacitação nem tampouco estrutura laboratorial para estudar o comportamento deste material especificamente e que esses elementos diamantados não foram fabricados para as características dos mármore e granitos brasileiros.

No caso dos granitos, as dificuldades são maiores do que nos mármore devido a maior abrasividade da rocha, o que leva a um consumo mais rápido

dos elementos diamantados, também, devido à resistência mecânica, que obriga a uma redução considerável na velocidade de corte que, em média, corresponde nos mármore a 11 m²/h enquanto que nos granitos 3 m²/h. Pode-se afirmar que no atual estágio tecnológico somente o consumo de fio diamantado corresponde a um valor significativo em relação ao custo total da operação, atingindo em média 12 m²/m de fio nos mármore e 4 m²/ m de fio nos granitos. O custo unitário de corte médio é da ordem de US\$ 20.00 /m² nos mármore e US\$ 70.00/m² nos granitos. Este é um índice econômico importante, que deve ser levado em conta para decisão do uso da tecnologia de fio diamantado, principalmente, nas rochas graníticas, onde deve ser relacionado com o valor de mercado do material. Contudo, em comparação com as técnicas tradicionais, a tecnologia de fio diamantado garante um aumento na recuperação e uma melhor qualidade do produto das minas.

O presente trabalho se propõe estudar, em laboratório, a partir do conhecimento das características físicas e mecânicas de alguns granitos de pedreiras em atividade de produção no Ceará, o emprego da técnica de extração por fio diamantado, através da avaliação dos elementos diamantados (perólas de vários tipos) fabricados pelas indústrias de elementos abrasivos.

2. ESTADO D'ARTE DE EXTRAÇÃO

Segundo STELLIN JÚNIOR; CARANASSIOS⁽¹⁾ a evolução mundial da indústria extrativa das rochas ornamentais, através do séculos, começou na Itália, no ano de 80 A.C. Inicialmente, Roma fazia uso do mármore travertino, o qual se encontrava próximo à cidade e, posteriormente, deslocando a sua mão-de-obra escrava, passou a realizar a extração do mármore das montanhas Apuanas, cujo centro mundial do setor é Carrara. Muitos artistas das mais variadas épocas dentre eles Michelangelo, iam às montanhas Apuanas escolher no local o material adequado para as suas obras.

O autor⁽¹⁾ comenta que nos primórdios, os blocos de mármore eram extraídos através da introdução de cunhas de madeiras 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 introduzindo-os nos orifícios das falhas e fraturas do maciço, visando a obtenção de blocos.

Segundo CAPUZZI⁽²⁾ nessa evolução destacam-se os métodos de extração de blocos, iniciada com explosivos nos anos de 1500 a 1550. No início do século, em 1900, a Itália passou a usar o fio helicoidal como tecnologia de lavra para o corte dos blocos de mármore e a partir de 1977, introduziu, na região de Carrara, a tecnologia do cortador à corrente e do fio diamantado. No espaço de 10 anos registrou-se uma rápida evolução, e no final da década de 80 foi introduzida a tecnologia do fio diamantado para

granitos, na região da Sardenha, Itália.

O autor ⁽²⁾ descreve os métodos de lavra a céu aberto e subterrâneo empregados nos mármoreos da região de Carrara e os critérios de escolha desses métodos bem como a tecnologia de corte. Segundo o autor, atualmente, em virtude de um progresso considerável na expansão da atividade industrial, estão disponíveis diversas soluções, capazes de satisfazer às exigências técnicas produtivas nas mais variadas situações de lavra de uma jazida de rochas ornamentais, que dependem da natureza da rocha em questão e de suas características físico-mecânicas e estruturais.

CAPUZZI⁽²⁾ complementa ilustrando, através de figuras e/ou desenhos esquemáticos, as etapas de operações de lavras nas pedreiras de mármoreos em produção na Itália e no mundo utilizando fio helicoidal e diamantado. O autor destaca a experiência operativa de grupos de empresas italianas nos problemas de extração de mármoreos.

Segundo BLASI *et al.*⁽³⁾ as atividades de mineração envolvem não somente as etapas de lavra mas, também, da pesquisa mineral a partir do conhecimento geológico dos depósitos, ou seja: a prospecção geominerária, onde o objetivo principal é associar a característica da jazida com o plano de aproveitamento econômico, através de ações concatenadas por meio de conhecimentos adquiridos no decorrer da pesquisa mineral passo a passo, que justifique assumir o custo e, portanto, o crescente risco. Alguns autores mostram a experiência operativa de empresas de prospecção e pesquisa

mineral de mármore e granitos em vários países do mundo, onde é dada extrema importância ao conhecimento geológico na fase inicial da pesquisa para uma tomada de decisão, a qual prepara a atividade extrativa cujas etapas são: individualização e caracterização da jazida e, elaboração de um plano de aproveitamento econômico. Para um maior aprofundamento do tema tratado os autores⁽³⁾, recomendam os trabalhos elaborados por BRADLEY⁽⁴⁾.

CICCU⁽⁵⁾ alerta que o conhecimento prévio das características de uma determinada formação rochosa representa condição indispensável para uma correta escolha da metodologia de lavra e programação racional a ser adotada com a finalidade de obter o melhor desempenho da atividade produtiva. Assim, para uma adequada pesquisa e investigação do tipo geológica, mineral-petrográfica e tecnológica são importantes a realização de estudos antes e durante a atividade extrativa, com a finalidade de definir ao máximo, a presença e distribuição espacial das descontinuidades (falhas, veios, fraturas, de resfriamento e/ou tectônicas, juntas de estratificação, etc.), bem como os defeitos da rocha (anomalias e diferenciações de composição, presenças de elementos de alteração, porosidade, microfraturamento dos cristais etc.), capazes de influenciar diretamente na comercialização do material em questão.

O autor⁽⁵⁾ ressalta que particularmente no caso do granito é de extrema importância individualizar a direção preferencial de orientação dos cristais e do plano de melhor clivagem, os quais são necessários para definir a orientação ótima para frentes de avanço da lavra, bem como dos planos para as

subdivisões sucessivas. De modo geral, em um maciço rochoso é notado a presença de famílias distintas cujos planos de descontinuidades são as vezes ortogonais entre si, e em outros casos não. As distâncias entre tais descontinuidades são aquelas que devem definir o volume dos blocos que pode ser aproveitado no maciço rochoso. Além do que, o tipo de jazida deve ser a condição para uma correta escolha do método de lavra e a tecnologia utilizada na pedreira. Tais procedimentos na forma de como encarar o problema, são na maioria dos casos desconsiderados por parte dos empresários do setor, demonstrando na maioria das vezes sua preferência em confiar na própria intuição e inventividade, aliada a uma larga experiência de campo, deixando de lado as possibilidades de conduzir o trabalho através de uma programação racional das operações. As metodologias atualmente disponíveis permitem uma programação e condução de investigações progressivas com diversos níveis de profundidade baseados em critérios de escolha para a decisão. O estudo geológico geral da região interessada permite reduzir a área em questão em zonas mais favoráveis, nas quais serão conduzidas pesquisas geológicas de detalhes nos afloramentos, individualizando as linhas de fraturação e as anomalias estruturais. Medidas geofísicas podem dar com certa precisão um quadro da situação em subsuperfície, com particular referência ao andamento das continuidades estruturais existentes. Eventuais sondagens podem ainda definir as extensões das faixas de oxidação e de alteração, derivadas de processos de resfriamento.

O autor⁽⁵⁾ explica que ao atingir um certo grau de conhecimento da

reserva em questão, tais como forma e volume disponíveis, qualidade do material, dimensões dos blocos a serem lavrados, características geológicas e petrográficas, deve-se passar ao estudo de planejamento da lavra da pedreira definindo sua metodologia de extração e recuperação ambiental. Um bom projeto de lavra exige a melhor escolha do método a ser empregado, adotando-se tecnologias adequadas, onde devem ser identificados os níveis produtivos que se queira atingir de acordo com as características da jazida, preocupando-se particularmente com medidas que preservem as zonas interessadas e também com as condições de higiene e segurança do trabalho. O planejamento e organização das operações devem ser dotados de uma razoável flexibilidade de modo a oferecer condições de encontrar soluções alternativas durante o transcorrer da atividade industrial, interferindo racionalmente nas hipóteses inicialmente adotadas, muitas vezes acentuadas para os casos de pedreiras abertas em áreas desconhecidas ou que sejam direcionadas a valorização de novos materiais, seguindo a tendência de mercado.

BORTOLUSSI *et al.*⁽⁶⁾ confirmam a relação existente entre os resultados produtivos da lavra (rendimento, dimensão e forma dos blocos) e as características mínero-petrográficas (tipo e distribuição das fraturas e imperfeições dos blocos), e sugerem utilizar um controle estatístico dos dados, confirmando, assim, a necessidade de embasar a etapa de lavra sobre um conhecimento suficientemente aprofundado dos condicionantes geológicos e tecnológicos do jazimento. O potencial econômico de uma reserva de mármore ou granito depende do rendimento da lavra, através da dimensão dos blocos

obtidos, que não deverá ser inferior a um limite determinado pelo valor comercial unitário do material extraído. Dessa forma a produção da pedra está diretamente influenciada pelo estado de fraturamento da jazida e pela qualidade da rocha. O fraturamento e as descontinuidades geomecânicas limitam as dimensões dos blocos a serem extraídos, que deverão ser compatíveis com os tipos de maquinária das operações de lavra. A qualidade está relacionada com as características da rocha (tipo petrográfico, textura, composição mineralógica, índices físicos e mecânicos, anomalias genéticas, presença de veios e de elementos degradáveis).

CICCU⁽⁵⁾ alerta para um aspecto de extrema importância e que na maioria dos casos não é levado em consideração, referindo-se a necessidade de harmonizar desde o início da atividade de produção, ações relacionadas a recuperação do meio ambiente. Muitas vezes o normal desenvolvimento da atividade produtiva fica comprometida devido a escassa disponibilidade de espaço, principalmente nas áreas onde a quantidade de poeira é excessiva. Verifica-se freqüentemente casos de pedreiras, onde a colocação de material estéril encontram-se extremamente concentrados em espaços muito reduzidos, chegando as vezes a poucos metros da frente de lavra, acarretando conseqüências para as futuras possibilidades de desenvolvimento da lavra, além de ocasionar um forte impacto visual na paisagem.

CICCU *et al.*⁽⁷⁾ descrevem as atividades de lavra de granito ornamental na região da Sardenha, Itália e sua fundamental importância na economia do País. Os autores apresentam as características físico-mecânicas dos granitos

da Sardenha, através da caracterização tecnológica dos materiais, apresentam, também, os métodos de lavra e tecnologias de corte utilizadas na região. A seguir, complementam com um estudo técnico-econômico do ciclo produtivo, analisando as operações de lavra efetuadas numa bancada e comparando às diversas tecnologias tradicionais de corte.

BORTOLUSSI *et al.*⁽⁸⁾ apresentam juntamente com os métodos de lavra / tecnologias tradicionais e inovadoras, utilizados na Itália, um quadro geral dos problemas relativos a produção de blocos de mármore e granitos, focalizando com atenção os aspectos mais importantes quanto ao correto emprego da engenharia de minas, a organização ótima de operação, que venha contribuir para o desmonte dos blocos de granito, e a sucessiva subdivisão do volume dos mesmos, visando a obtenção dos blocos comerciais para o posterior desdobramento. Os autores chamam atenção para a importância do conhecimento geológico das jazidas no planejamento das atividades de lavra numa pedreira e da escolha da tecnologia de corte em função do tipo de jazimento.

CICCU *et al.*⁽⁹⁾, através do Departamento de Engenharia Mineral da Universidade de Cagliari, estudaram por vários anos, as tecnologias de extração de rochas ornamentais e controle ambiental na Itália onde estas consistem de métodos diferenciados, de acordo com a natureza dos materiais.

Segundo CICCU *et al.*⁽⁹⁾ as pedreiras de rochas carbonatadas empregam técnicas de corte avançadas com ferramentas diamantadas

utilizando o cortador a corrente diamantada e fio diamantado, com os quais se obtém bom desempenho e produção de melhor qualidade com custos inferiores aos alcançados com os métodos tradicionais de corte contínuo tais como: fio helicoidal e cortador a corrente de metal duro, porém não diamantado .

De acordo com os autores⁽⁹⁾ as rochas intrusivas, em especial o granito, têm a extração efetuada, fundamentalmente, com técnicas tradicionais, baseadas na perfuração, utilizando-se para a separação cordel detonante com razão de carga uniforme, tanto para o corte primário como o secundário e cunhas para as operações de recorte e esquadrejamento de blocos. O corte de abertura (criação da face livre) é freqüentemente feito com “flame-jet”. Estas tecnologias, por sua vez, geralmente, causam prejuízo ao ambiente de trabalho e às áreas circunvizinhas, provocando reações de repulsividade principalmente nos casos de pedreiras próximas às zonas urbanas. Os autores alertam para o controle do meio ambiente na Itália e consideram a possibilidade, por completo, de introdução das novas tecnologias, como o uso do próprio fio diamantado, convenientemente adaptado ao trabalho com materiais mais resistentes e o “water-jet” a grande velocidade com ou sem adição de areias abrasivas.

Segundo os autores⁽⁹⁾, há várias configurações de pedreiras distribuídas por todo o território italiano, onde há ocorrência de diferentes tipos litológicos e geograficamente heterogênea. Muitas explorações são desenvolvidas em zonas de montanhas caracterizadas por relevos pronunciados, nas quais as

frentes de lavra abertas no topo ou em meia encosta são geralmente bem visíveis. É o caso da zona de ocorrência do mármore de Carrara, na qual os relevos são preponderantemente alterados por conta das operações de lavras, que conferem um aspecto inconfundível à paisagem. Nas zonas de planície o impacto sobre a paisagem é menos acentuado, mesmo porque as pedreiras tendem a desenvolver-se em profundidade. Em contrapartida, aumentam os problemas de interação com os centros urbanos ocasionando problemas nas atividades econômicas como agricultura, expansão territorial urbana e industrial, turismo entre outros como os de caráter protetor, principalmente a água. Portanto, intervenções de recuperação ambiental ou de restituição das áreas para usos alternativos são facilitadas e normalmente traduzem vantagens para a coletividade como acumulação hídrica, descarga controlada de rejeitos, atividades industriais alternativas, etc. É interessante a tendência atual, nas pedreiras de mármore, de passar progressivamente da lavra a céu aberto para subterrânea, cuja evolução natural é ditada por motivos econômicos e de reservas geológicas.

2.1. Metodologia de Lavra

Segundo BORTOLUSSI *et al.*⁽¹⁰⁾, os métodos de lavra definem a seqüência espacial e temporal de acordo com as quais a jazida será subdividida em volumes projetados e organizados que seguem uma ordem hierárquica funcional de extração. A aplicação de uma metodologia de lavra para uma determinada jazida permite, em qualquer instante do seu desenvolvimento, a definição da geometria espacial da mina em toda a sua

peculiaridade; a primeira operação é a identificação dos volumes, para em seguida determinar a seqüência de extração. Aparenta de forma evidente que a definição das tecnologias, equipamentos ou materiais e energia, bem como as relativas modalidades de uso, representam uma informação adicional e não substitutiva no método.

As jazidas de mármore e granitos normalmente possuem reservas muito superiores às das simples atividades produtivas e os volumes de interesse dependem essencialmente da geometria dos limites da reserva geológica ou das exigências técnicas colocadas pelo método de lavra e das tecnologias de corte⁽¹⁰⁾.

De modo geral, a duração das atividades de lavra em uma determinada jazida é superior aos tempos de amortização dos equipamentos empregados, que são móveis (equipamentos de perfuração, de movimentação e transporte montados sobre pneus ou esteiras, equipamentos de corte, etc.) ou semifixos (redes de distribuição de energia e ar comprimido, instalações de movimentação de cargas, etc.) e, portanto, transferíveis de acordo com a evolução da lavra⁽¹⁰⁾.

Por tais razões, a jazida é subdividida em projetos para porções delimitadas sob bases de condições geoestruturais ou sob bases de áreas de ações de eventuais sistemas de carregamento e movimentação semifixos constituindo-se em unidades produtivas da pedreira. O método de lavra indica as modalidades segundo cada volume que será lavrado⁽¹⁰⁾.

Os autores⁽¹⁰⁾ alertam que na maioria dos casos, os métodos de lavra das rochas ornamentais são descendentes seja nas pedreiras a céu aberto, seja naquelas em subterrâneo, desenvolvendo-se através da instalação de praças contendo uma ou mais bancadas. Os trabalhos preliminares destinados a preparação das pedreiras de rochas ornamentais referem-se especialmente à retirada da cobertura de solo dos afloramentos e lavra por bancadas, bem como da abertura de praças. Normalmente, as espessuras de cobertura dos depósitos de rochas ornamentais, desenvolvidos por métodos de lavra a céu aberto, é relativamente pequena, e de fato as jazidas desenvolvidas são aquelas onde os afloramentos são totalmente descobertos ou possuem um pequeno capeamento de terreno agrícola. Em tais situações, a retirada da cobertura de solo pode, em alguns casos, revelar uma camada de material rochoso internamente fraturado e alterado, podendo atingir espessuras superiores a alguns metros. Existem casos em que estes estratos rochosos assumem valores tão elevados que tornam a lavra a céu aberto economicamente inviável.

CICCU⁽⁵⁾ explica que a melhor escolha do método de lavra a ser definido, é função da morfologia dos afloramentos, dos volumes da reserva mineral, da análise do plano estrutural da jazida, do seu estado de fraturamento, da localização geográfica da área, e das características intrínsecas do material objeto da exploração. Os principais métodos de lavra utilizados e que estão descritos a seguir são: lavra por bancadas, lavra por painéis verticais, lavra por desmoronamento, lavra seletiva, lavra de matacões e lavra subterrânea.

2.1.1. Lavra por bancadas

De acordo com os autores CICCUC⁽⁵⁾ e CARANASSIOS⁽¹²⁾, nos métodos conhecidos como lavra por bancadas, a jazida é subdividida em praças através de superfícies, subparalelas. As bancadas são lavradas de forma sequencial ou ao mesmo tempo, mantendo uma praça de dimensões adequadas para as diversas frentes de lavra ativas. As praças podem ser horizontais ou levemente inclinadas e as espessuras (alturas) são definidas com base nas características da jazida e das tecnologias de corte empregadas.

O método de lavra por bancadas normalmente é adotado nas fases de lavra avançadas, quando a pedreira assume configurações geométricas regulares com altura de bancadas uniformes. Este tipo de método de lavra permite adotar módulos organizados eficientes, caracterizados pela utilização otimizada das unidades produtivas. Além disso, este método possibilita operar com praças articuladas sobre mais frentes de avanço, de modo a compensar eventuais deficiências qualitativas ou para adaptar de maneira rápida as oscilações dos níveis de produção desejadas^(5, 11 e 12).

Os autores^(5, 11 e 12) comentam que a solução de altas bancadas permite otimizar as operações de seleção através de duas ou mais fases sucessivas de subdivisão. A partir do maciço, são isolados, mediante a realização de cortes primários, volumes de grandes dimensões com forma de paralelepípedo, subdivididos sucessivamente, através de cortes secundários, em subvolumes, dos quais, através de operações de esquadreamento, são obtidos, finalmente,

os blocos de rocha com as dimensões comerciais. A disponibilidade de espaços operacionais adequados e planejados permite o desenvolvimento dos trabalhos de lavra, que obedecem esquemas organizados, normalizados e cíclicos, sem vínculos com as tecnologias adotadas.

Os autores^(5, 11 e 12) alertam que existem casos, onde os equipamentos concebidos dentro de uma filosofia construtiva simplificada, com limitada flexibilidade operacional, pode representar em algumas situações, a solução preferível, do ponto de vista econômico, quando comparados com equipamentos que recorrem a sistemas mais complexos e prestações mais amplas. Em contrapartida, do ponto de vista técnico, a introdução de uma mecanização mais avançada, torna-se preferível nos casos de pedreiras dotadas de um planejamento concebido através da execução de desenhos regulares. Na realidade, o que ocorre na prática é que os níveis de produção desejados são atingidos através de equipamentos menos versáteis e quase sempre subdimensionados, os quais sofrem com as condições severas de trabalho que caracterizam as operações de uma pedreira de rocha ornamental. Por outro lado, os critérios que indicam a escolha de equipamentos dotados de maior potencialidade e flexibilidade, invariavelmente mais onerosos, devem ser cuidadosamente analisados, de modo a evitar que estes redundem na sua subutilização e, conseqüentemente, inadequação.

A título de exemplificação, de acordo com os autores^(5, 11 e 12), quando se analisa o sistema de perfuração, o parâmetro determinante para o seu dimensionamento é representado pela sua incidência específica em termos de

metros perfurados por metro cúbico final, variável de acordo com a recuperação da lavra. Como regra geral, para incidências da ordem de 20 a 30 m/m³ os sistemas de perfuração convencionais são considerados adequados, enquanto o recurso a sistemas do tipo integrado, de grande potência, se aplicam para incidências superiores a 50 m/m³.

Os autores^(5 e 12) classificam como uma particularização do método de lavra por bancadas aquele onde a altura da bancada corresponde a uma das dimensões do bloco, normalmente a maior. O denominado método de lavra por bancadas baixas, consiste na extração de blocos de dimensões finais, diretamente do maciço rochoso, sem a necessidade de recorrer a processos de subdivisões sucessivas. O desenvolvimento da frente de lavra pode ser extenso e articulado, principalmente nos casos de elevados níveis de produção. O método de lavra por bancadas baixas se aplica perfeitamente nos casos onde a jazida possui conformação tabular e possui planos de descontinuidade paralelos subhorizontais. Geralmente este tipo de lavra por bancadas baixas possibilita maior flexibilidade, devido ao fato de que a orientação da frente pode ser facilmente modificada em função de fatores estruturais, permitindo assim a obtenção de elevados níveis de produção mediante o incremento da mecanização e a adoção de sistemas de trabalho mais simples e cíclicos, não incluindo a execução de etapas delicadas, como por exemplo, a derrubada de bancadas ou painéis.

Os autores^(5 e 12), comentam que essa metodologia de lavra também oferece vantagem do ponto de vista da segurança do trabalho, pois esta reduz

a exposição do risco de quedas com conseqüências graves, além de permitir um controle apurado da estabilidade das frentes. Do ponto de vista ambiental, este método oferece menor impacto visual sobre o meio ambiente devido a uma reduzida superfície exposta, além de possibilitar a recuperação da área degradada, mesmo quando a atividade de lavra encontra-se em pleno processo exploratório. Em contrapartida, a seletividade no processo de lavra torna-se uma operação extremamente difícil de realização, traduzindo-se, conseqüentemente, em uma redução significativa nos níveis de produção.

2.1.2. Lavra por painéis verticais

Segundo CICCU⁽⁵⁾ e CARANASSIOS⁽¹²⁾ o método de lavra por painéis é adotado na fase inicial de abertura das pedreiras e também nos casos onde é permitido o desenvolvimento em profundidade, devido as limitações das reservas ou aos particulares condicionamentos das jazidas. Neste caso, a jazida é subdividida, no projeto de lavra, em painéis verticais, cuja espessura coincide com uma das dimensões do bloco comercial; inferiormente os painéis são delimitados pela cota do plano da praça e de acordo com a superfície topográfica e, a sua altura será variável em relação ao perfil dos afloramentos. Para os casos de afloramentos com gradiente topográfico elevado, as dimensões verticais dos painéis, crescem rapidamente com o avanço da frente de lavra, gerando assim, problemas de perfurações profundas; alternativamente, adota-se a implantação de níveis intermediários.

Os autores^(5, 11 e 12) atentam que a extensão da área dos painéis é

relativamente grande e permite uma boa seletividade. Para os casos dos afloramentos de fácil acesso, a adoção de perfuração hidráulica dotada de braços articulados e versáteis pode representar uma solução adequada em relação aos comuns “martelos de coluna”, os quais demonstram-se incômodos devido a problemas de instalação e fixação em superfícies que, na maioria dos casos, são irregulares. A solução hidráulica favorece também a um controle com maior precisão para a realização dos furos.

Os autores^(5, 11 e 12) alertam para uma outra condição que leva a adoção deste método de lavra é quando se está diante de tipos de rocha de grande heterogeneidade qualitativa e estrutural que exigem intervenções de selecionamento imediatas. Por outro lado, suas conseqüentes repercussões sobre o território constituem-se extremamente negativas quando existem: extensas superfícies frontais de escavação; poucas possibilidades de execução de ações que proporcionem a restituição da área durante o desenvolvimento da atividade produtiva e significativos volumes de reposição de rejeitos devido as elevadas proporções de material descartado produzido, que pode chegar até 80% do volume extraído. Isto representa um problema importante e de difícil solução.

2.1.3. Lavra por desmoronamento

De acordo com os autores CICCUC⁽⁵⁾ e BORTOLUSSI *et al.*⁽¹⁰⁾ o método de lavra por desmoronamento é aplicado para os casos em que a rocha apresenta-se sob a forma de prismas delimitados por falhas ou planos de

estratificação subverticais, dispostos em afloramentos caracterizados por elevados gradientes topográficos. Neste caso, enormes volumes de rocha são removidos por meio de desmontes realizados através do carregamento de explosivos na base, perfurados na forma de leques, ou dentro de pequenas galerias de explosão, localizadas entre os planos de fraturas.

Os autores^(5 e 10) acrescentam que num passado relativamente recente, os métodos de lavra de rochas ornamentais por desmoronamento predominavam pela falta de alternativa, viável economicamente, não obstante as baixíssimas recuperações de lavras obtidas. Com o aparecimento das técnicas de corte, seguidas de uma crescente sensibilização para a proteção dos valores ambientais, os métodos de lavra por desmoronamento registraram um constante e gradual desinteresse e sua aplicação é limitada a poucos casos, onde prevalecem todas as condições favoráveis, ou seja, abundância de reservas, localização isolada, disponibilidade de áreas de grande extensão para a deposição dos rejeitos e características estruturais favoráveis.

Os autores^(5, 10, 11, 12) ressaltam que embora sejam tomados todos os cuidados e precauções, é inevitável o desperdício de uma considerável quantidade de fragmentos não utilizáveis junto a poucos grandes blocos de formatos irregulares que necessitam de longas operações de cortes secundários, recortes e esquadreamento contribuindo ainda mais para produção de material destinado a área de deposição de rejeitos. Em função da grande incidência de trabalhos de preparação, principalmente quando o desmonte prevê o isolamento e deslocamento de vários milhares de toneladas

de rocha, o risco de insucesso na operação, mesmo que seja em parte, poderá acarretar consideráveis perdas econômicas. Os custos incrementam-se sobremaneira, devido a necessidade de remover consideráveis volumes de material da frente de lavra até as zonas de deposição de rejeito, de modo a liberar os espaços e não comprometer a evolução dos trabalhos na frente de lavra. De modo geral, as condições de segurança, no método de lavra por desmoronamento, são consideradas críticas.

2.1.4. Lavra seletiva

Segundo CICCUC⁽⁵⁾, CARANASSIOS⁽¹²⁾ e ALENCAR⁽¹³⁾ o método de lavra seletiva aplica-se freqüentemente nos casos onde o maciço a ser explorado possui como característica a presença de famílias distintas de fraturas com orientações principais, preferencialmente ortogonais. Assim sendo, tais fraturas podem ser aproveitadas como planos naturais de separação de porções rochosas, onde através de cortes complementares, obtém-se volumes liberados e prontos para a realização das operações de recorte e esquadreamento.

Os autores^(5, 11 e 12) comentam sobre a diferença fundamental entre o método de lavra seletiva e o método por desmoronamento, a qual reside na adoção de critérios de selecionamento que permitem a identificação de volumes de rochas suscetíveis de serem deslocadas e transportadas ao passo que o método por desmoronamento condiciona os trabalhos de confecção dos blocos no local onde se posicionam as porções rochosas após o desmonte

principal. No que se refere aos processos de organização dos trabalhos de exploração, o método de lavra seletiva permite a transferência imediata dos blocos primários, caracterizados pela suas formas irregulares, até a área de praça destinada aos trabalhos de esquadrejamento, através de potentes pás-carregadeiras sobre pneus, as quais são operadas de modo versátil e ágil em espaços operacionais muitas vezes limitados.

Os autores^(11 e 13) atentam para o fato de que normalmente a recuperação da lavra é muito baixa e, portanto, torna-se necessário adotar velocidades elevadas para o desenvolvimento dos trabalhos exploratórios mediante a utilização de equipamentos que permitam versatilidade, potência e alta produtividade, bem como, também, para as etapas de transporte na pedreira. De modo geral, a configuração da pedreira apresenta-se com seus elementos constituintes bastante definidos (frentes de lavra, praças, rampas de acesso, áreas de manobras, zonas de deposição de rejeitos, etc.). A geometria das frentes de lavra fica condicionada ao andamento das fraturas responsáveis pelas delimitações da superfície.

2.1.5. Lavra de matacões

Os autores^(1, 5, 11, 12 e 13) comentam que a utilização do método de lavra por matacões encontra-se ainda largamente utilizada nos países em desenvolvimento, principalmente naqueles localizados na faixa tropical, onde existem matacões de grandes dimensões, normalmente, pouco afetados por fenômenos de alteração. O método é dos mais simples e pode ser conduzido

através de mão-de-obra pouco especializada. Geralmente a porção de rocha destacada do corpo principal é dividida em duas partes, mediante o emprego de pólvora negra carregada com dosagens crescentes em um furo central, localizado no plano preferencial de separação. As duas porções de rocha são sucessivamente subdivididas e esquadrejadas no próprio local.

De acordo com os autores^(1, 5, 11 e 13), a viabilidade econômica das operações depende principalmente da qualidade da rocha. Se por um lado os custos operacionais são relativamente baixos, por outro lado corre-se o risco de obter-se recuperações insuficientes quando comparada a extensão das zonas alteradas, dificilmente previstas com antecedência. Na Itália, onde os métodos de lavra por bancadas regulares atingiram um grau de desenvolvimento avançado, demonstrando resultados econômicos satisfatórios, os matacões são considerados como obstáculos a serem eliminados através da sua destruição integral, determinando, assim, de maneira rápida a instalação de lavra por bancadas.

Segundo CHIODI FILHO⁽¹⁴⁾ os resultados mais visíveis do problema da lavra de matacões no Brasil são trazidos pela baixa categorização comercial, submissão de preços e dificuldade de abertura de novos mercados para exportações, tanto de materiais em bruto quanto de produtos acabados e semi-acabados. O autor salienta que os depósitos formados por matacões, têm vida útil bastante limitada, salvo algumas raras exceções. Em muitos casos, grande parte dos matacões não são aflorantes, sendo detectados e expostos somente após grande romoção de solo. Isto dificulta a previsão de produção da lavra,

trazendo como consequência o planejamento com horizonte de curto prazo e freqüente constrangimento na área comercial para empresa.

O autor⁽¹⁴⁾ ressalta que a lavra de matacões tem menor custo de produção (US\$ 50.00 a US\$ 80.00/m³), mas determina fortes restrições quantitativas e qualitativas de suprimento, resultando, ainda, em grande impacto paisagístico e danos consideráveis ao meio ambiente. Na lavra de maciço rochosos, o custo de produção é superior (US\$120.00 a US\$ 180.00/m³), mas sua prática proporciona melhor controle de qualidade e melhores taxas de recuperação dos materiais, garantindo suprimento do mercado, firmando a comercialização e causando menor degradação ambiental. O autor observa que a maior parte da produção brasileira de granitos é ainda derivada da lavra de matacões e que a lavra de maciços é praticada sem o rigor técnico desejável.

2.1.6. Lavra subterrânea

Os autores^(9, 11, 12 e 13) comentam que através do progresso e desenvolvimento tecnológico, tem-se procurado aproveitar ao máximo a disponibilidade de reservas de uma boa jazida. Sob este ponto de vista, torna-se interessante a tendência da passagem progressiva das lavras conduzidas a céu aberto, para as subterrâneas, cuja evolução natural é proporcionada por razões econômicas e pelas características geológicas da reserva mineral. Existem alguns casos em que a lavra subterrânea é adotada para alguns tipos de materiais que, mediante a utilização das novas tecnologias, podem

sustentar o confronto econômico com os métodos conduzidos a céu aberto; ou aquelas que por motivos de valorização do material, não são lavradas a céu aberto.

A atividade de abertura de lavra em subsolo é realizada através da criação de espaços subterrâneos, denominados salões, sustentados por pilares, geralmente constituídos por material de qualidade inferior, uma vez que estes não serão explorados. A relação entre as áreas dos salões e pilares, em alguns casos é elevada. Estes aspectos ficam destinados a piorar, visto que com a abertura em cotas cada vez mais profundas, devido a lavra de praças inferiores, incrementam-se os esforços de tensão sobre os pilares além da probabilidade do aparecimento de novas fraturas conseqüentes dos esforços provocados pelo carregamento e da sua interação com a abertura de vazios ^(11, 12 e 13).

Os autores ^(9, 11 12 e 13) alertam que este método vem sendo utilizado predominantemente nas rochas carbonatadas, particularmente nos mármore, que são rochas mais tenras, e conseqüentemente apresentam uma maior facilidade de corte com as novas tecnologias. Torna-se de extrema importância a realização de um cuidadoso projeto de lavra associado a um vigilante e rigoroso controle dos vazios criados pela atividade de extração. De modo particular, salienta-se a necessidade da equação de controles sistemáticos da temperatura e das instalações, além de instrumentos capazes de realizar medições de deslocamentos diferenciais, mediante o uso de sinais luminosos ou acústicos, instrumentos adotados e consagrados em outros campos, que

envolve o estudo da mecânica das rochas. Não deve-se esquecer de realizar controles sobre o estado dos pilares de sustentação, através de técnicas de medições extensiométricas ou geofísicas.

Do ponto de vista ambiental, os autores ^(9, 11 e 12) citam que o impacto sobre a paisagem é mínimo, em contrapartida cresce exponencialmente a importância dos problemas de controle de estabilidade a curto e longo prazo, principalmente nos vazios de grande volume (da ordem de milhares de metros cúbicos). Estes ficam sobrecarregados de pacotes rochosos com distribuição heterogênea que com o passar do tempo, devido ao desenvolvimento dos trabalhos de abertura dos salões, determinarão deslocamentos solicitados pelo maciço, sendo muito difícil de prever mesmo adotando-se medidas de controle instrumental.

2.2. Tecnologia de Lavra

Os autores ^(5, 10, 11 e 12) afirmam que o desenvolvimento e o progresso tecnológico oferecem diversas opções para a execução das operações que integram os ciclos operacionais dos métodos de lavra, permitindo desta maneira definir a escolha ótima em função do tipo da morfologia da jazida, de suas reservas, das características mineralógicas, petrográficas e estruturais da rocha, da infra-estrutura local existente, do valor de mercado do material e também das disponibilidades financeiras do empregador. Alguns destes fatores representam a evolução e o aperfeiçoamento das técnicas tradicionais, consagrado e de largo emprego. Outros são de caráter inovador e merecem

considerações particulares.

Segundo os autores^(5 e 11) dentro das tecnologias denominadas como tradicionais, pode-se dividir em dois grupos principais: a) tecnologias cíclicas e b) tecnologias de corte contínuo.

2.2.1. Tecnologias cíclicas

Os autores^(5 e 11) explicam que 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, preponderantemente, na perfuração, e são caracterizadas de grande versatilidade e poder de adaptação em situações de atividades extrativas as mais diversas. De modo prático, existe uma completa compatibilidade nos confrontos dos diferentes métodos de lavra, mas nem sempre é prudente recorrer integralmente a sua utilização, preferindo-se muitas vezes adotar combinações de tecnologias heterogêneas.

2.2.1.1. Corte através de perfuração e explosivo

Os autores^(8, 10, 12 e 13) comentam a técnica de corte que se baseia na utilização de explosivos carregados em furos dispostos próximos entre si e que definem um plano de corte. Segundo eles, esta tecnologia encontra-se com seu uso muito abrangente e, de certa forma, preferido pela maioria das empresas voltadas a produção de blocos, devido a sua versatilidade e

facilidade de execução, inclusive pelos seus custos, normalmente inferiores aqueles de técnicas alternativas, para o caso de pedreiras cuja produção é médio-baixa. Além dos motivos citados anteriormente, a tecnologia de corte através de perfuração e explosivo, tem como característica principal, sua fácil adaptação nas mais variadas configurações de projeto de pedreira, mesmo quando as bancadas não obedecem a um padrão de regularidade. Como complementação, esta técnica possibilita a realização de trabalhos para a lavra de matacões.

Os autores^(8, 10 e 12) acrescentam que essa técnica consiste na realização de um certo número de furos paralelos cujos eixos coincidem com o plano de corte. Estes furos são carregados, então, com explosivos dosados com uma carga linear extremamente baixa, destinadas a provocar a ruptura da rocha somente entre os furos. Um aspecto de vital importância, principalmente no que se refere a realização dos cortes primários e secundários, reside nos critérios de escolha do tipo de explosivo e no dimensionamento dos parâmetros que vão definir o plano de fogo, de particular modo, o espaçamento entre os furos (de 10 a 40 cm) e a carga linear por furo (de 2 a 10 g/t). O esquema de desenvolvimento desta técnica é normalmente articulado em fases de subdivisões sucessivas. Este procedimento oferece a vantagem de decidir de maneira mais conveniente os planos de cortes secundários e delimitação dos blocos, levando-se em consideração os defeitos presentes nas várias superfícies a serem inspecionadas.

SMITH⁽¹⁵⁾ faz um histórico de como a tecnologia por desmonte com

explosão controlada em rochas graníticas surgiu na Finlândia, onde engenheiros de minas de vários países estariam interessados nessa técnica para a produção de rochas ornamentais com carga moderada de explosivos.. Em Portugal, Espanha e Itália desmontes semelhantes têm sido executados recorrendo principalmente ao cordel detonante. Segundo o autor,, inicialmente, os equipamentos de produção mecanizada foram usados e permitiram uma melhoria na precisão da linha de perfuração de modo que a carga explosiva ficou mais controlável. Melhoramentos posteriores resultaram do advento de equipamentos de perfuração hidráulica acompanhados por economia de energia e custos de trabalhos. Como resultado, blocos com mais de 1.000 t podem, agora, ser desmontados sem danos à sua estrutura física e os blocos secundários, em torno de 35 t, podem ser efetivamente manejados entre as etapas de operação da lavra.

BORTOLUSSI *et al.*⁽¹⁰⁾ confirmam que a experiência nórdica europeia (finlandesa, em particular), é orientada segundo a preferência dos explosivos à baixa velocidade de detonação, ao limite da classe dos deflagrantes, confeccionados em cartucho de pequeno diâmetro de 11 e 17 mm, ligados e centralizados no furo, com relação aos diâmetros internos de 0,3 - 0,5 mm, e fator de desacoplamento variável entre 0,1 e 0,2 mm. A velocidade de detonação é inferior a 4.000 m/s e o desenvolvimento do gás é capaz de promover sobre a superfície controlada uma ação de pressão suficiente para deslocar ou derrubar o volume isolado contra o espaço defronte. A pólvora, por sua vez, é considerada um baixo explosivo, com velocidade de detonação lenta (< 3.000 m/s).

BORTOLUSSI *et al.*⁽¹⁰⁾ complementam que em França algumas minas continuam a preferir a pólvora negra devidamente dosada, visando romper o bloco sem fragmentação. A direção da superfície de destaque é controlada mediante a criação de uma cava e introdução de uma cápsula de explosivo na fratura ao longo da geratriz diametralmente oposta. De acordo com os autores, na Itália, vem se generalizando o uso do cordel detonante. O mesmo é considerado um alto explosivo, com velocidade de detonação alta, constituído pelo tetranitrato de penta-critritol (nitropenta), detona com velocidade variando de 6.800 a 7.200 m/s e possui diferentes gramaturas, com a mesma velocidade de detonação: NP-10 = 10g de nitropenta por metro e assim sucessivamente NP-5 = 5g, NP-3 = 3g e NP-2 = 2g. O NP-10 é o cordel que possui a maior energia de choque e, conseqüentemente maior capacidade de fraturar a rocha. Dessa forma, normalmente, todos os furos são carregados com um único puxão ao longo da extensão da frente de lavra.

Segundo os autores⁽¹⁰⁾ dependendo das características da rocha, em alguns casos, tem sido experimentado esquemas diferentes, consistentes em seqüência repetida de furos carregados alternativamente com um único puxão e dois intervalos com furos guias descarregados, deixando inalterados o espaçamento e a quantidade de explosivo. Quando o volume de bancada a destacar é relevante e a espessura excede de 6 a 7 m, a carga linear é aumentada com carregamento duplo. O tiro é sempre simultâneo e pode associar concomitantemente dois e até três planos de destaque. Geralmente acha-se vantajoso associar na operação idêntica os dois cortes principais da bancada, vertical e horizontal, após abertura dos cortes laterais com "flame-jet".

BERGMANN *et al.*⁽¹⁶⁾ desenvolveram experimentos instrumentados de modelo de desmonte de rochas em blocos de granitos homogêneos, relativamente grandes, para determinar os efeitos dos resultados sobre as detonações, provenientes da energia dos explosivos (pressão, velocidade de detonação e densidade), bem como os efeitos dos fatores geométricos tal como a distância da carga. Nestes experimentos, verifica-se que a fragmentação por explosão não é controlada por uma única propriedade dos explosivos, tal como a energia, mas por uma combinação de energia com velocidade de detonação, diversidade, grau de acoplamento entre explosivo e a parede do furo, bem como pela velocidade sônica da rocha, fator de potência e geometria da carga.

WARBURTON⁽¹⁷⁾ alerta para os inevitáveis efeitos causados pelos explosivos na detonação quanto a estabilidade de rampa remanescente, onde, novas fissuras são formadas e as fraturas já existentes são aumentadas e, o material é deixado numa condição inaproveitável. De acordo com o autor, não existe uma teoria compreensiva que tenha sido formulada com respeito as detonações. Entretanto, os mecanismos de propagação da onda de cisalhamento, fragmentação e fluxo de gás são suficientemente bem conhecidos para prover fórmulas matemáticas parciais dos vários tipos de detonação, e informação empírica considerável é obtida para ajudar em decisões práticas na frente de lavra.

KUTTER; FAIRHURST⁽¹⁸⁾ estudaram, como casos separados, os efeitos da onda de choque emitida e o efeito causado pela expansão do gás

pressurizado. Os autores afirmam que isto produz as duas forças principais na detonação. Segundo os autores a detonação é caracterizada pela presença de uma onda de choque que percorre a coluna de carga com uma velocidade variável, em função do explosivo e das condições de ignição e confinamento. A fase dinâmica de detonação inicia-se, justamente, com o aparecimento desta onda de choque percorrendo a coluna de explosivo. A sequência cronológica dos eventos que ocorrem durante o conhecimento das ondas de choque é basicamente a seguinte: aparecimento das fraturas radiais, reflexão das ondas de choques nas faces livres e retorno das ondas de choque com o aparecimento das fraturas tangenciais.

BROWN⁽¹⁹⁾, LAMBOOY; ESPLEY JONES⁽²⁰⁾ atentaram para o sucesso das técnicas de desmonte com detonação controlada em escavações de engenharia civil de superfície, onde elas são comumente usadas para assegurar paredes retentoras de som. A técnica mais aplicável a mineração a céu aberto é a de detonação controlada, a qual deixa um contorno de corte final perfeito sem nenhum “overbreak” ou dano de retorno ao material remanescente. Isto é conseguido deflagrando simultaneamente um número de cargas desacopladas em furos paralelos axialmente perfurados no plano da frente pretendida. A operação é comumente chamada pré-controlada ou pós-controlada dependendo se ela precede ou segue o resto da seqüência de detonações.

PERSSON; LUNDBORG⁽²¹⁾ estudaram as ondas de choque e os processos de fragmentação inicial da matéria condensada que circunda uma

carga detonante, onde foram apresentados os resultados dos modelos de explosão em “plexiglass”, experimentos em rochas e cálculo de computador, tendo ilustrado a diferença básica entre a detonação de crateras e detonação de bancadas. Os autores concluíram que o principal efeito da onda de choque no desmonte de bancadas em rochas duras é provocar rachaduras radiais em torno do furo produzido. No entanto aquelas já existentes são aumentadas pela onda de tensão que retorna da superfície livre. Estas rachaduras se estendem e o bloco é finalmente destacado sob a influência da pressão do gás no furo produzido. O trabalho feito pelo gás, depois que a onda de choque provoca o destaque é, em grande parte, proveniente da energia total do explosivo e é dependente da densidade da carga.

ITO *et al.*⁽²²⁾ comentam que a detonação controlada é uma técnica criada para fazer o contorno final obtido no desmonte aparecer, como se a rocha fosse cortada com uma faca, deixando o restante praticamente não danificado, sem “overbreak”. Segundo os autores, através da observação da face criada por esta técnica, pode ser praticamente reconhecida que uma linha de fissura maior é criada de furo a furo os quais foram executados em paralelo no plano projetado da quebra e são poucas as rachaduras nas outras direções.

CARDU⁽²³⁾ estudou a técnica do corte com cordel detonante, onde descreveu e discutiu vários exemplos da aplicação da tecnologia de perfuração e explosivo. Segundo a autora a técnica com cordel detonante é atualmente a mais difundida para extração de rochas duras e abrasivas em maciço rochoso. Na Itália, o consumo anual de cordel detonante utilizado na extração de

rochas ornamentais em cortes primários e secundários, equivale a 12.000 km. Os dados analisados são provenientes de minas de granitos do norte da Sardenha e referem-se ao corte primário e separação de bancadas secundárias.

Os autores^(10, 12, 15, 19, 20, 22 e 23) afirmam que o corte através de perfuração e explosivo será utilizado ainda por muito tempo como tecnologia dominante em função do baixo custo unitário e da flexibilidade operacional, para os casos de rochas cujas características admitem totalmente a aplicação desta técnica. Entretanto cresce a exigência de oferecer garantias de melhores e mais elevados níveis de produção, segurança do trabalho e integridade do material, principalmente quando o material é destinado ao revestimento de grandes superfícies dispostas verticalmente e, invariavelmente, sujeito a relevantes esforços dinâmicos. De acordo com os autores^(10, 12 e 13), esse aspecto técnico cria margem para desenvolvimento de tecnologias alternativas, que além de promoverem uma lavra que preserve a integridade do material, melhorem as condições de segurança e higiene do trabalho e ofereçam ainda perspectivas de melhoria e controle dos impactos ambientais (poeira, ruído, vibrações, ondas de sobre pressão, etc.), principalmente quando a atividade extrativa desenvolve-se próximos aos centros urbanos.

2.2.1.2. Perfuração contínua

Os autores^(12 e 13) comentam que a perfuração contínua constitui-se em mais uma tecnologia baseada na perfuração sem uso de explosivo e que

atualmente apresenta ótimos níveis de eficiência.

Segundo BORTOLUSSI *et al.*⁽¹⁰⁾, essa técnica comporta a execução dos furos justapostos, de modo tal a obter um plano de ruptura contínuo ou interrompido de aberturas suficientemente fracas, para permitir um fácil destaque por tração. A necessidade de um perfeito paralelismo e com planaridade do furo põe limites evidentes ao longo do comprimento.

Segundo os autores^(12 e 13), sua competitividade em relação ao “flame-jet” é bastante evidente nas aberturas de canais, revelando-se extremamente vantajosa. Outra vantagem que apresenta, reside no fato desta representar a solução alternativa ao uso do flame jet nas proximidades de áreas urbanas, ou ainda, quando persistem condições desfavoráveis da rocha, tais como: textura, vitrificação, trincas por superaquecimento, realização de rebaixos, etc. ROCHAS DE QUALIDADE^(24 e 25) descreve alguns tipos de equipamentos de perfuração contínua como alternativas ao maçarico de corte em lavra de granitos. Há, todavia, algumas limitações, em bancadas altas, quando existem irregularidades na superfície de apoio para o equipamento, como é o caso da lavra por painéis verticais.

2.2.1.3. Divisão mecânica através de cunhas

Os autores^(12 e 13) chamam atenção quanto aos outros procedimentos na perfuração. Uma das técnicas amplamente empregada é aquela que utiliza os dispositivos com cunhas, responsáveis pelas operações de subdivisão da

rocha de acordo com planos pré-estabelecidos, geralmente, direcionados nos planos preferenciais de orientação dos minerais. Esta técnica de corte é utilizada, principalmente, nas fases finais de recorte e esquadramento dos blocos ou ainda nas operações de recuperação de blocos na lavra de matacões. Sua limitação encontra-se na execução de cortes em superfícies maiores.

BORTOLUSSI *et al.*⁽¹⁰⁾ explicam que na Europa (Portugal, Itália e Espanha) a técnica de corte mecânico, através de cunhas, possui emprego principalmente nas operações finais de obtenção dos blocos comercializáveis. Embora esta técnica acarrete irregularidade na superfície cortada, com uma considerável perda no volume vendido, este procedimento possui preferência devido ao seu custo reduzido, até o momento em que o emprego de técnicas mais modernas não lhe retirem a viabilidade econômica.

2.2.1.4. Divisão através de agentes expansivos

Os autores^(12 e 13) comentam a técnica que emprega o uso de agentes expansivos que é utilizada, na maioria dos casos, diretamente sobre os blocos, embora esta demonstre poucas possibilidades de sucesso devido a lentidão de sua ação associada a um elevado custo. Normalmente, para os cortes de pequena superfície a solução dominante é aquela que emprega dispositivos de cunhas mecânicas ou hidráulicas e, para superfícies maiores, aparecem problemas operacionais que dificultam sobremaneira a sua utilização. Portanto, o seu emprego não é recomendado para escavações de

minas a céu aberto e subterrânea com largas frentes de trabalho.

Segundo DUARTE⁽²⁶⁾ no Brasil, esse método de desmonte não é utilizado para rochas ornamentais. Neste setor, seu emprego relata pequenos ensaios exploratórios para desmonte de rochas sem a preocupação de preservar o bloco como produto acabado da mina. Em ensaios realizados em pedreiras de rochas ornamentais em alguns Estados (Espírito Santo, Bahia e Ceará), esta técnica mostrou-se como bom aplicativo no resultado de corte de blocos. No entanto os resultados obtidos nos cortes longos de bancada apesar de satisfatório do ponto de vista técnico, torna-se proibitivo do ponto de vista econômico, uma vez que o seu custo operacional chegou a cinco vezes o valor do desmonte convencional (perfuração e explosivo).

2.2.2. Tecnologias de corte contínuo

Os autores^(5, 11, 12 e 13) explicam que as tecnologias de corte contínuo constituem-se basicamente naquelas cuja operações são efetuadas sem o uso predominante da perfuração e explosivo. Este tipo de tecnologia encontrou sua consolidação nas operações de rochas de origem carbonatadas (mármore). Dentre estas destacam-se o fio helicoidal e os cortadores a corrente. Outro tipo de tecnologia de corte contínuo é o “ flame-jet ” utilizado nas pedreiras de granito para solucionar o problema da abertura de canais e rebaixos, onde a falta de superfícies livres inviabilizam o uso de explosivos.

2.2.2.1. Fio helicoidal

Segundo os autores^(2, 11 e 13) a tecnologia de corte por fio helicoidal, aplicada com sucesso no passado em algumas pedreiras norte-americanas e italianas, é considerada hoje obsoleta e encontra utilização ocasional somente em alguns países em desenvolvimento que possuem dificuldades de absorver técnicas de corte mais modernas. Para esses casos a viabilidade econômica é sustentada pelo fato de tratar-se de utilização em rochas macias e com pequena concentração de quartzo, nas quais o corte pode ser feito com relativa facilidade através do uso de areia quartzosa como elemento abrasivo. Nas rochas silicáticas, onde a concentração de quartzo é nitidamente superior, seria necessário o emprego de carborundo com elemento cortante o que elevaria o custo operacional.

CHIODI FILHO⁽¹⁴⁾ comenta que o fio helicoidal baseia-se no movimento, em circuito fechado, de um fio construído por três cabos de aço na forma de hélice, tencionado contra a superfície rochosa a ser cortada. O fio helicoidal, puxado por um motor, corre através de roldanas a uma velocidade de 10 a 15 m/s e sob tensão de 150 a 250 Kg. O plano de corte é orientado através de poços, furos de grandes diâmetro e trincheiras laterais, por onde se introduz o fio para início do corte. Para a maximização do avanço e resfriamento do fio, utiliza-se polpa abrasiva de água com areia. A areia deve ser essencialmente quartzosa e com grãos angulosos, de diâmetro entre 0,1 e 1,0 mm. A mistura da polpa deve manter constante uma proporção em peso, de 70% de água e 30% de areia.

BORTOLUSSI *et al.*⁽¹⁰⁾ ressaltam que este tipo de tecnologia consolidou-se sobretudo nas operações de corte das rochas carbonatadas, em particular o mármore. As rochas carbonáticas são preponderantemente lavradas com utensílios de corte contínuo, em particular com o fio helicoidal associado ao cortador a corrente diamantada. Estas, quando empregadas para os mármore representam um bom desempenho e melhor qualidade do produto com custos inferiores, em relação aqueles típicos de técnicas de corte descontínuo.

Segundo os autores^(10, 12 e 13), com o advento do fio diamantado para o corte em rochas tipo graníticas, o emprego do fio helicoidal tem encontrado limitações quanto ao seu uso em virtude do elevado custo do abrasivo, relativa lentidão do corte e dificuldade dos cuidados do mecanismo de corte e, em particular, no que se refere a 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 agravada 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. A tabela 2.1 apresenta os parâmetros operacionais de corte com fio helicoidal no mármore.

**TABELA 2.1 - PARÂMETROS OPERACIONAIS DE CORTE COM FIO
HELICOIDAL NO MÁRMORE**

MODALIDADE OPERACIONAL	PARÂMETROS
Comprimento do fio (km)	1,0 - 4,0
Diâmetro do fio (mm)	3,5 - 5,0
Velocidade periférica do fio (m/s)	6,0 - 18,0
Potência instalada (kw)	10,0 - 40,0
Velocidade de corte (m ² /h)	0,5 - 1,5
Comprimento do corte (m)	10,0 - 20,0
Consumo de água (l/m ²)	300 - 400
Consumo de abrasivo (kg de areia/m ²)	100 - 150
Tipo de abrasivo	areia ou carborundum

Fonte: DIGITA - Universidade de Cagliari

2.2.2.2. "Flame-Jet"

Segundo os autores^(12, 13 e 14) o "flame-jet" utilizado como tecnologia de corte contínuo, consiste em uma câmara de combustão revestida de material refratário, na qual são inseridos simultaneamente o comburente (ar comprimido = 1.500°C ou oxigênio = 2.500°C) e o combustível (querosene ou óleo diesel) nebulizado que proporciona uma chama análoga àquela produzida pelo maçarico oxiacetilênico. A temperatura de saída do gás varia de 1.200 a 1.300 °C, ou mais, no caso da utilização de oxigênio como comburente.

Os autores^(12, 13 e 14) explicam que o processo de corte na rocha, isto é, a desagregação, não se obtém por fusão mas sim pelo fato de a elevada temperatura promover a dilatação dos minerais que, estando em uma situação de confinamento, não podem expandir-se deliberadamente, ocasionando, assim, por crepitação, o rompimento de acordo com as superfícies cristalográficas. A aplicação do "flame-jet" é reconhecidamente reservada às rochas plutônicas e particularmente àquelas intrusivas ácidas (granitos) constituídas de minerais com revestimento cristalino completo. A tabela 2.2 mostra alguns dados produtivos registrados na utilização do "flame-jet" em rochas graníticas.

**TABELA 2.2 - PARÂMETROS TÉCNICOS E OPERACIONAIS DE CORTE
COM "FLAME-JET" NOS GRANITOS.**

MODALIDADE OPERACIONAL	PARÂMETROS
Temperatura da chama (°C)	1500 - 2500
Largura do corte (cm)	10
Avanço do corte por passadas (mm)	6,0
Velocidade de corte (m ² /h)	0,5 - 1,5
Inclinação (graus)	60
Consumo de ar comprimido (m ³ /min)	10
Pressão do ar comprimido (MPa)	0,85
Consumo de combustível (m ³ /h)	0,045

Fonte: DIGITA - Universidade de Cagliari

BORTOLUSSI *et al.*⁽¹⁰⁾ comentam que essa técnica foi experimentada com sucesso nos Estados Unidos no taconito de Minnesota. Segundo esses autores nas pedreiras mais modernas, o “flame-jet” é utilizado apenas para cortes cegos de abertura lateral das bancadas. A técnica só pode ser aplicada em rochas silicatadas e preferencialmente homogêneas, pois o corte é promovido através de dilatação térmica diferencial, por crepitação dos silicatos e, sobretudo, do quartzo. Concentrações de minerais máficos e vesículas de quartzo, que caracterizam heterogeneidades texturais, podem sofrer vitrificação e prejudicar o corte. Através da lança que suporta o bico de chama, executam-se cortes com até 8 m de profundidade, sendo de 8 a 10 cm a espessura do corte. Pela ação do calor, ficam prejudicadas as duas bandas laterais ao corte, havendo assim perda de uma faixa com espessura variável entre 10 a 30 cm.

Os autores^(11, 12 e 13) chamam atenção que a introdução do “flame-jet” nas pedreiras de granito ofereceu a possibilidade de solucionar satisfatoriamente o problema da abertura de canais e rebaixos. Embora seja ainda largamente usado 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 (anomalias, veios, falhas e fraturas), impacto ambiental acentuado (ruídos, produção de poeira tóxica), necessidade de vínculos organizacionais (espaços amplos para seu desempenho excluindo a possibilidade das demais operações na mesma área).

CHIODI FILHO⁽¹⁴⁾ concorda com os autores^(11, 12 e 13) que os problemas de aplicação do corte com “flame-jet” relacionam-se ao alto nível de ruído (130 a 140 dB), calor e produção elevada de pó. Na Europa, os custos operacionais abrangendo equipamentos, combustíveis e mão de obra da ordem de UIS\$ 100.00/m².

VIDAL⁽²⁷⁾ faz uma avaliação do setor extrativo do Ceará, enfocando os granitos, através de análises das jazidas e/ou minas, nos seus mais diversos aspectos de tecnologias de lavra utilizadas nas pedreiras do Estado. Destaca a tecnologia de corte por “flame-jet” como sendo uma das mais usadas nas pedreiras do Ceará, onde os empresários apreciam a simplicidade da sua utilização e o baixo investimento para aquisição do equipamento mas, não observam as perspectivas futuras e os seguintes fatores: elevado custo energético, as limitações ou dificuldades de emprego correlacionadas às características da rocha (diferenciações mineralógicas anômalas, veios, falhas e fraturas), a irregularidade das superfícies produzidas, os danos no material, algumas vezes, em grandes extensões, o elevado impacto ambiental e a introdução de mudanças organizacionais nos ciclos de trabalhos de lavra, em virtude da necessidade de amplos espaços para o seu uso, impedindo outras operações na área interessada do corte.

2.2.2.3. Cortador à corrente

Segundo os autores⁽¹³⁾ as primeiras experiências com cortadores à corrente, equipados com ferramentas a base de carbeto de tungstênio,

inspiradas naquelas utilizadas na extração subterrânea dos carvões no final da década de 30, ocorreram em 1965 na Bélgica e em França, para a produção de mármore coloridos.

De acordo com os autores^(13, 25 e 26) os primeiros testes realizados na Itália com o cortador a corrente foram nos mármore da região de Carrara, com resultados bastante satisfatório, conseguindo-se velocidade de corte de 5 m²/h, porém com freqüentes quebras e difícil operacionalidade nas jazidas. O aprimoramento tecnológico generalizado, associado à fixação mecânica dos elementos de corte, contribuíram para uma relevante difusão da referida técnica nas áreas produtivas de mármore na Itália, passando a ser considerada, a partir da década de 70, indispensável na abertura de pedreiras subterrâneas.

Os autores^(13 e 26) complementam dizendo que na maioria dos casos, o cortador à corrente, possui braços com 2 a 3 m de comprimento, representa um recurso integrado e/ou de preparação para o uso de outras técnicas. Possui emprego generalizado na abertura de galerias, devido ao recurso de movimentação horizontal e vertical dos braços. O cortador a corrente é constituído de um braço sobre o qual desliza uma corrente dentada que gira na periferia do mesmo e direciona o corte. Para as rochas menos tenazes utiliza-se dentes de metal duro (vidia). Para material mais duro, arredonda-se os dentes, diminuindo o seu comprimento para aumentar a robustez, e substitui-se os mesmos por peças diamantadas. O custo do corte aumenta conforme a tenacidade da rocha. De acordo com os autores o uso de cortadores à corrente

armada com utensílios em carbeto de tungstênio parece não ter alcançado a difusão esperada por parte do fabricante.

Segundo Duarte⁽²⁶⁾, no Brasil não é utilizado esse sistema no entanto, na Itália ainda é empregado em extrações de mármore, em lavra a céu aberto e subterrânea; sendo proibitivo para rochas graníticas, em virtude do desgaste excessivo das ferramentas de corte. A tabela 2.3 apresenta os parâmetros de corte de acordo com a sua dureza, em diferentes tipos de mármore.

TABELA 2.3 - PARÂMETROS DE CORTES COM CORTADOR A CORRENTE, DE ACORDO COM SUA DUREZA

TIPO DE MÁRMORE		VELOCIDADE DE CORTE (m ² /h)
Classificação de Dureza	Nome	
Macio	Comblanchien	12,0
	Peperino	10,0
	Travertino	7,0
Semiduro	Petit Granit	5,0
	Serpeggiate	4,5
Duro	Vila Viçosa	2,0

Fonte: ACIMM - Associação dos fabricantes de equipamentos

2.2.3. Tecnologia avançada de corte

CICCU⁽²⁸⁾ descreve um estudo d'arte de tecnologia avançada da atividade produtiva de rochas ornamentais, fazendo considerações às tecnologias modernas de corte, em particular, mantendo em evidência as vantagens técnico-econômica e as implicações quanto ao uso dessas tecnologias.

Segundo CICCU^(5 e 28) a atividade de extração das rochas ornamentais tem registrado um crescente progresso, verificado seja no aperfeiçoamento das tecnologias tradicionais, seja na proposta de técnicas modernas caracterizadas por ótimas prestações e melhores condições de ambiente do trabalho. Em alguns casos significativos, as tecnologias inovadoras apresentaram custos inferiores e muitas vezes demonstraram-se viáveis economicamente, melhorando ainda a precisão do corte e mantendo íntegra a qualidade da rocha. As novas tecnologias de cortes introduzidas a nível industrial nas pedreiras são de um lado aquelas baseadas no uso de elementos diamantados (fio e corrente diamantada) e do outro, aquelas que utilizam jatos d'água a grande velocidade (puros ou com abrasivos). O autor chama a atenção para a importância de uma tecnologia competitiva do ponto de vista econômico, que corresponda as necessidades de uma pedreira moderna, onde são possíveis a implantação do fio diamantado e "water-jet", que certamente deverão acelerar o processo de substituição nos próximos anos.

CICCU⁽²⁹⁾ alerta para o conhecimento técnico das diversas propriedades tecnológicas das rochas ornamentais, visando sua aplicação, uso e adequação e discute o problema de possível degradação do material, personalizando técnicas de controle para melhorar a durabilidade no tempo.. Dentre estas, destacam-se a condição de qualidade do produto, pelo uso de tecnologias na lavra, capaz de salvaguardar a integridade do material através das suas características geológicas e tecnológicas, não se limitando ao aspecto estético, mas, também, ao processo de transformação capaz de assegurar um ótimo nível de qualidade, além dos fatores degradantes quando da sua aplicação (agentes químico, físico-mecânico e biológico).

2.2.3.1. Cortador a corrente diamantada

Segundo os autores^(13 e 26), o cortador a corrente diamantada é constituído de uma corrente com uma nova concepção, diferente do antigo cortador à corrente. O mecanismo é semelhante, porém com a diferença que os dentes de metal duro são substituídos por peças diamantadas. Trata-se de um equipamento moderno, composto por um braço até o máximo de 4 metros de comprimento, dotado de corrente, onde em seus anéis são aplicados elementos abrasivos constituídos de segmentos ou plaquetas de diamantes sinterizados, que podem ser substituídos após o seu desgaste. O braço possui forma e dimensões variáveis, de acordo com a profundidade do corte a ser realizado. Apresenta, ao longo de seu perímetro, uma série de furos próximo entre si, através dos quais é injetada água para seu resfriamento, que possui também funções de auxiliar o movimento da corrente diamantada.

Essas correntes diamantadas permitem a realização de mais de 1.000 m² de corte em mármore mais duros, antes da sua substituição total. Porém tornam-se necessárias intervenções para a substituição de outras partes que compõem a corrente, como por exemplo, os patins e a própria corrente, limitando aproximadamente a 400 m² a superfície teórica a ser cortada sem interrupções. Para o caso dos granitos, os resultados técnicos obtidos são bastantes inferiores se comparado aos mármore^(13 e 26)

Segundo os autores^(13 e 26) no caso dos mármore os custos unitários de corte com cortador a corrente diamantada são superiores aos do fio diamantado, o qual realiza o corte com mecanismo análogo e, portanto, com semelhante energia específica, porém com espessura reduzida. No Brasil, não é utilizado esse sistema. No entanto na Itália, é largamente empregado em extrações de mármore, em lavra a céu aberto de bancadas baixas e lavra subterrânea. A velocidade de corte dificilmente supera a taxa de produção de 2 m²/h, mesmo utilizando-se sistema de maior potência. As principais vantagens da tecnologia de cortador a corrente diamantada residem no fato de se obter uma superfície perfeita de corte, não necessitando, desde o início até o final do corte, a execução de trabalhos preparatórios.

2.2.3.2. Fio diamantado

CAPPUZI⁽³⁰⁾ descreve o procedimento do corte com fio diamantado na extração de rochas carbonatadas (mármore), apresentando as primeiras máquinas de corte com esta tecnologia e a diferença entre o sistema

operacional da máquina hidráulica e do tipo elétrica.

BERTOLINI *et al.*⁽³¹⁾ comentam a substituição da tecnologia do fio helicoidal, através da evolução constante das tecnologias de abrasivos diamantados nas minas de Carrara, Itália, sob o ponto de vista técnico e aplicativo, para os cortes de paredes verticais, e pisos horizontais com diferentes tipos de máquinas da época. Os autores destacam a máquina eletrodinâmica como sendo de última geração para o corte com fio diamantado e argumentam a necessidade de muito estudo na família de ligas de materiais com os abrasivos diamantados eletrodepositados e sinterizados, no que diz respeito ao tipo e forma de utensílios, para o uso no corte principalmente das rochas silicatadas.

Os autores^(2, 5, 10, 11, 12, 13 e 28) comentam que as técnicas baseadas no uso de elementos diamantados assumiram num passado recente amplo uso no caso das rochas carbonatadas, registrando um progresso notável quanto ao desenvolvimento do método e do equipamento. O intenso esforço de aperfeiçoamento dos equipamentos e das ferramentas acompanhados de um adequado estudo do mecanismo de corte, permitiram elevar os parâmetros do fio diamantado nas pedreiras de mármore a níveis muito elevados, determinando a difusão generalizada em curto espaço de tempo. Os parâmetros obtidos com emprego do fio diamantado nos cortes de rochas silicatadas (granitos) são obviamente inferiores àqueles alcançados nas rochas carbonatadas (mármore), em virtude da maior dureza e abrasividade dos granitos, que acarretam problemas particularizados para a fabricação dos fios

diamantados, elementos abrasivos e dos próprios equipamentos.

Segundo CAPUZZI⁽²⁾ o desenvolvimento da tecnologia do fio diamantado decorreu da necessidade de superar as inconveniências técnicas típicas do fio helicoidal. Os primeiros equipamentos de acionamento do fio diamantado foram inspirados nessa tecnologia. A estrutura e o princípio de funcionamento dos equipamentos de última geração do fio helicoidal, também proporcionaram o desenvolvimento dos protótipos de máquinas para o acionamento do fio diamantado. Os estudos iniciais para sua construção surgiram no início da década de 70 e os primeiros protótipos começaram a operar por volta de 1977.

CAPUZZI^(2 e 30), CICCUC^(5 e 28) e CARANASSIOS⁽¹²⁾ complementam dizendo que depois do aparecimento do fio diamantado há alguns anos, substituindo gradualmente o fio helicoidal, esta nova tecnologia de corte é objeto de contínuo desenvolvimento e aperfeiçoamento. A melhoria desta técnica vem proporcionando maiores velocidades de corte da rocha, maior capacidade de manobra de todo o equipamento bem como uma melhor compartimentação do volume de rocha a desmontar, além da otimização dos componentes constituintes do próprio fio diamantado.

De acordo com CAPUZZI⁽³⁰⁾ e BERTOLINI⁽³¹⁾, o componente mais importante do fio diamantado consiste em um cabo de aço de 5 mm de diâmetro no qual são introduzidas com certa sequência anéis com pérolas de diamantes (elementos abrasivos de diamantes) que são fabricadas por dois

métodos distintos: eletrodeposição e sinterização. As eletrodepositadas são constituídas segundo um processo químico, através de banhos galvânicos, que utiliza como eletrólito um composto de sais de níquel. Sobre cada pérola é depositado aproximadamente 0,30 a 0,40 quilate de diamante sintético com granulometria entre 40 e 60 mesh. As sinterizadas consiste em homogeneizar o metal com o diamante sintético numa granulometria entre 41 e 50 mesh e, solidifica-los fazendo uso de elevadas pressões e temperaturas. A principal diferença entre os dois tipos de anéis nos fios diamantados é que nas pérolas eletrodepositadas a velocidade de corte decresce linearmente com uso, enquanto as sinterizadas mantém uma velocidade de corte constante durante a vida útil do anel.

BERTOLINI⁽³¹⁾ e CRESPO⁽³²⁾ atentam para a recente tendência a favor das sinterizadas em vista da diferença significativa em termos de custos operacionais. Os fabricantes de material diamantado desenvolveram um novo anel com pérolas de diamantes sinterizadas de menor diâmetro e conseqüentemente surgiu um novo fio diamantado com 30 anéis/metro, cabo de aço de 3 mm e 49 fios, e anéis de 6,5 mm de comprimento por 7 mm de diâmetro. Parece, até o momento, que o uso de tais elementos abrasivos tenha dado resultados positivos em determinados tipos de rochas, particularmente em rochas metamórficas de estrutura cristalina (Mármore tipo Carrara, Rosa Portugal, Branco e Rosa da Grécia e Turquia) ou em rochas metamórficas silicáticas como os serpentinitos da região de Vaimalenco e os Verdes dos Alpes.

Segundo os autores ^(12 e 13) tem se registrado, principalmente, na Itália e Espanha uma crescente evolução nos equipamentos e no fio diamantado. O intenso esforço de aperfeiçoamento dos equipamentos e das ferramentas, acompanhados de um adequado estudo do mecanismo de corte, permitiu elevar os parâmetros do fio diamantado nas pedreiras de mármore a níveis muito elevados, determinando a difusão generalizada em curto espaço de tempo. Atualmente, é bastante comum atingir, nos casos mais favoráveis, velocidades de corte da ordem de 15 m²/h com produtividade do fio superior a 30 m²/m. A tabela 2.4 apresenta um confronto entre as modalidades operacionais e de prestação entre as tecnologias de corte por fio helicoidal e diamantado para as rochas carbonatadas (mármore).

Segundo CARANASSIOS⁽³³⁾ e BORTOLUSSI⁽³⁴⁾, no caso dos granitos as dificuldades são maiores do que nos mármore devido a maior abrasividade da rocha; isto leva a um consumo mais rápido do elemento diamantado, e também, devido à resistência mecânica, que obriga uma redução considerável na velocidade de corte. Com base na realização de corte com uso do fio diamantado em pedreiras de granitos, estas operações revelaram valores de velocidade de corte na lavra variando entre 1,5 a 6 m²/h, de acordo com o tipo de rocha, e revelaram uma produtividade do fio entre 2 a 5 m²/m.

**TABELA 2.4 - CONFRONTO ENTRE OS PARÂMETROS DAS
TECNOLOGIAS DE FIO DIAMANTADO E HELICOIDAL
PARA MÁRMORES**

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: DIGITA - Universidade de Cagliari

Segundo os autores^(28, 33 e 34), as primeiras experiências com a aplicação do fio diamantado nos maciços de rochas silicatadas (granitos) mostraram valores não muito animadores. Na composição do custo de corte no granito com esta tecnologia, são preponderantes os custos operacionais e, dentre estes, há incidência do fio em relação ao seu rápido desgaste. O custo unitário de corte das rochas silicatadas é, ainda, relativamente alto e, em grande parte, está associado ao preço do próprio fio diamantado, responsável, aproximadamente, por 80% do custo unitário total. Verifica-se, também que o crescente emprego desta tecnologia para os granitos e o aumento da produção de fio diamantado reduzem gradualmente o preço de venda, consequentemente, viabilizando em muitos casos, a escolha desta técnica.

Os autores^(28, 33 e 34) chamam atenção que, em comparação com as 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 de meio ambiente devido ao uso de “flame-jet” e de explosivos, principalmente, nos granitos sensíveis aos efeitos das detonações. Nota-se, no caso da extração dos granitos, a utilização cada vez mais crescente do fio diamantado como substituto do “flame jet”. A tabela 2.5 apresenta os parâmetros técnicos entre o corte com fio diamantado e “flame-jet” para rochas tipo graníticas.

TABELA 2.5 - PARÂMETROS TÉCNICOS ENTRE O CORTE COM O FIO DIAMANTADO E “FLAME-JET” PARA GRANITOS

PARÂMETROS TÉCNICOS	FIO DIAMANTADO	“FLAME-JET”
Velocidade de 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 - 30,00
Consumo de água (m ³ /h)	3,0	-
Mão-de-obra (nº de homens)	1,0	2,0
Nível do ruído (dB)	70	130

Fonte: DIGITA- Universidade de Cagliari

CARANASSIOS⁽³³⁾ e BORTOLUSSI⁽³⁴⁾ concordam com CAPUZZI⁽³⁰⁾, BERTOLINI⁽³¹⁾ e CRESPO⁽³²⁾ os quais ressaltam que para o tipo de fio

diamantado utilizado na extração de granito, onde os abrasivos diamantados que existem nos anéis de pérolas são elaborados por processo de sinterização,; no caso do granito, o diâmetro dos anéis com pérolas de diamantes é, normalmente, de 11 mm montadas em um cabo de 5 mm de diâmetro com espaçadores de plástico injetado. Segundo os autores o sistema de espaçadores plásticos foi desenvolvido em função de uma característica de maior abrasividade que o granito apresenta, onde a lama abrasiva ocasiona um desgaste excessivo do cabo, resultando em quebra prematura e o fim de sua vida útil, apesar dos anéis estarem ainda sãos. Para se conseguir a proteção plástica, os anéis são enfiados no cabo de aço e o sistema é colocado em um molde no qual o plástico é injetado de forma a preencher os espaços entre os anéis diamantados e o cabo. O plástico injetado tem diâmetro menor que aquele dos anéis de forma a não interferir no contato entre os mesmos e a rocha. Desta forma, o plástico protege o cabo de aço da erosão ocasionada pela lama abrasiva.

Segundo os autores^(12 e 13) os equipamentos pioneiros de acionamento do fio diamantado eram constituídos de chassi, um volante motriz, um carrinho, duas polias livres, um pistão hidráulico e dois circuitos oleodinâmicos responsáveis pelo acionamento do volante e do pistão de tração. O circuito de acionamento do volante era composto de um motor hidráulico, tubos de borracha para transmissão do óleo da bomba até o motor hidráulico, tubos de borracha para o retorno e respiro do óleo e uma bomba acionada por um motor elétrico de 25 a 35 CV. O circuito de acionamento com pistão era composto de dois tubos de borracha para transmissão do óleo, uma bomba acionada por

um motor elétrico de 0,5 CV e um pistão hidráulico. Estes equipamentos pioneiros com fio diamantado, ofereciam capacidades técnicas muito baixas, com velocidades de corte, para os casos dos travertinos de Tivoli, Itália, na faixa de 3 a 4 m²/h devido à pequena potência instalada.

Os autores^(12 e 13) comentam que para melhorar os parâmetros técnicos dos primeiros equipamentos foram necessários estudos de modelos mistos eletrohidráulicos e elétricos com tensionamento por contrapeso. O verdadeiro salto de qualidade foi obtido com o advento de equipamentos automáticos dotados de regulação eletrônica para o tensionamento. Os referidos equipamentos permitiram ainda a instalação de maior potência, além de possibilitar o funcionamento automático do sistema após a fase inicial de corte. Tratam-se de equipamentos dotados de plataforma que abriga a motorização principal e auxilia no deslocamento sobre os trilhos. O deslocamento da máquina é feito por meio do sistema de cremalheira-pinhão, ou através de patins solidários ao chassi que deslizam sobre trilhos tubulares.

O equipamento que utiliza o sistema de deslocamento por cremalheira-pinhão apresenta a vantagem de permitir o trabalho sobre bancadas inclinadas, reduzindo-se os tempos de preparação de deslocamento da máquina em superfícies horizontais e niveladas. O acionamento do pinhão é comandado por um pequeno motor elétrico de velocidade variável podendo ser regulada manualmente ou automaticamente de acordo com as exigências do corte^(12 e 13).

De modo geral, a regulação e o controle desses motores são feitos automaticamente e, em tempo real, através de um sistema de circuito fechado (retroação) que permite compatibilizar a potência de transmissão proporcional às variações das solicitações do trabalho a ser realizado. O operador deve simplesmente regular a corrente de absorção desejada para o motor principal, para que o circuito eletrônico entre em ação regulando de modo contínuo o tensionamento do fio diamantado, de forma que a corrente de absorção permaneça constante. O acionamento do equipamento é feito a distância por meio de um painel de comando ^(12 e 13).

Através desta sofisticação, evita-se o surgimento de vibrações anômalas no fio diamantado, e obtém-se a maximização no rendimento do equipamento a ponto de, nas versões dotadas de motor elétrico com potência de 37 kw, ou diesel na faixa de 59 kw, ser comum alcançarem-se, nos travertinos, velocidades de corte da ordem de 15 a 16 m²/h. Esta solução permitiu ainda aumentar sobremaneira a produtividade do fio diamantado, melhorando as condições de segurança e reduzindo fortemente os custos operacionais ^(12 e 13).

De acordo com os autores ^(12 e 13), os circuitos eletrônicos responsáveis pelo controle automático da máquina são regulados de modo a desligar o equipamento nos casos de acidentes como quebra do fio diamantado, superaquecimento do motor principal ou falta de água, permitindo, assim, que o operador possa executar outras tarefas na pedreira.

Segundo os autores ^(12 e 13) nos equipamentos acionados por motor diesel

o volante motriz é impulsionado por motores na faixa de 75-100CV, de 4 cilindros e resfriamento a ar. O consumo de diesel é de 10 a 15 l/h. O tanque é dimensionado de forma a obter-se autonomia operacional de, no mínimo, 12 h. A velocidade periférica do fio diamantado permite a variação na faixa de 20 a 40m/s, de modo a se conseguir a melhor regulação de acordo com o tipo de rocha. De modo geral, nos equipamentos de última geração, o volante principal possui diâmetro de um metro, o que permite ainda o deslocamento axial de 250 mm, oferecendo a possibilidade de realizar cortes paralelos sem necessidade de reinstalar o equipamento. Este dispõe ainda de polias com diâmetro de 350 mm os quais servem de guia para o fio diamantado.

De acordo com os autores^(12 e 13) no passado, o volante principal era posicionado no meio do chassi, isto é, no centro dos trilhos. Hoje é instalado lateralmente, obtendo-se como importante vantagem a rotação em torno do eixo, de modo a orientá-lo na posição desejada, dentro de uma revolução de 360 graus. Dessa forma é necessário que o fio diamantado seja posicionado no trecho do perímetro do plano de corte que deve coincidir com o plano do volante principal da máquina para proceder o corte.

Para a realização de cortes verticais é necessário que se façam dois furos: um vertical e outro horizontal, comunicantes entre si de modo a constituir uma parte do perímetro de corte. O fio diamantado é introduzido nestes furos passando também pelo volante principal, executando-se, em seguida, o seu fechamento no circuito. O equipamento é posicionado na extremidade sobre os trilhos próxima à frente de lavra e deslocado sobre os mesmos de modo que

mantenha o fio sob tensão, estando em condições de iniciar a operação de corte^(12 e 13).

A disposição do equipamento diante da frente de lavra constitui importante aspecto operacional para a execução dos cortes. De modo geral, existem duas possibilidades principais para cortes verticais: o equipamento posicionar-se ao pé ou sobre a bancada^(12 e 13).

Os autores⁽¹³⁾ ressaltam que outro aspecto importante é o tensionamento aplicado ao fio diamantado, que varia dentro de uma faixa de 1.000 a 3.000 N, e depende essencialmente da geometria de corte. De modo geral, as tensões para o corte de rochas silicatadas (granitos) são maiores do que as aplicadas a rochas do tipo carbonatadas (mármore).

De acordo com os autores⁽¹³⁾ a ausência de equipamentos fixos e com características dimensionais reduzidas oferecem à tecnologia do fio diamantado uma excelente versatilidade de utilização para as mais variadas condições operacionais que, associadas às vantagens de caráter técnico, contribuem significativamente para que este sistema encontrasse difusão universal nas pedreiras de mármore, e gradual utilização para as pedreiras de granito, em combinação com outras tecnologias.

Tratando-se de lavra de material com maior valor de mercado, o fio diamantado pode ser utilizado, inclusive para a execução dos cortes dos painéis. A grande vantagem que acarreta é a obtenção de blocos com, pelo

menos, duas faces lisas, aumentando-se dessa forma o volume efetivamente comercializável e, eliminando-se os tradicionais “descontos”, em função da melhor regularidade e forma dos produtos finais conseguidos na predreira⁽¹³⁾.

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 o esquadreamento de blocos irregulares, possibilitando uma ocupação racional da capacidade de tear e, conseqüentemente aumento da produção na serragem⁽¹³⁾.

Segundo os autores^(13 e 28) o desenvolvimento da tecnologia do fio diamantado permitiu a construção de equipamentos especiais destinados à produção de objetos bidimensionais para emprego na indústria de decoração e urbanística. Para a fabricação desses objetos foram concebidos equipamentos especiais acoplados à computadores, capazes de executar cortes em blocos de mármore, granitos e outras rochas por meio de desenhos que são executados através de programas computacionais.

Estudos atuais procuram conceber a fabricação de teares para o corte de blocos nas espessuras de 10, 20 ou 30 mm através de um sistema denominado multifio, que dispõe os fios paralelamente entre si, as tradicionais lâminas, dos teares, promovendo a serragem dos blocos em chapas^(13 e 28).

Os autores^(28 e 33) chamam atenção para a necessidade da realização

de testes visando conhecer o comportamento do fio diamantado, e de particular modo no que se refere à sua durabilidade em relação às condições de emprego no corte dos granitos e outras rochas duras e abrasivas. Sabe-se que a avaliação do consumo do elemento diamantado no decorrer do corte na pedreira constitui-se em uma tarefa de difícil realização devido à dificuldade de subordinar o desenvolvimento das operações industriais às exigências experimentais. No entanto, a experimentação em laboratório permite superar as dificuldades que se apresentam na realização de medições nas pedreiras, além de possibilitar a realização de testes com anéis diamantados de vários tipos sobre rochas de diferentes características.

BORTOLUSSI *et al.*⁽³⁴⁾ confirmam os problemas e dificuldades de obtenção de dados de produtividade da nova técnica relacionados as condições operacionais na indústria. Dessa forma, levando em consideração a experiência de campo e medidas de laboratório, são obtidos os parâmetros necessários a realização dos cortes.

CICCU⁽²⁸⁾, CARANASSIOS⁽³³⁾ e BORTOLUSSI⁽³⁴⁾ estudaram, através de experimentos, o desempenho do corte com fio diamantado em diferentes granitos da Itália e verificaram a importância dos ensaios em laboratórios, visando a orientação do uso dos fios diamantados oferecidos no mercado.

THOREAU⁽³⁵⁾ fez um levantamento da utilização do fio diamantado nas minas de granito em diferentes países. A tabela 2.6 apresenta os resultados, com um total de 35 máquinas que funcionam em diferentes minerações no mundo, sendo metade delas já em operação desde o início de 1988, onde pode-se verificar a contribuição do fio diamantado nas minas de granito.

TABELA 2.6 - RESULTADO DO USO DO FIO DIAMANTADO NA LAVRA DE GRANITO, EM DIFERENTES PAÍSES

PAÍS	REGIÃO	MATERIAIS	RESULTADO			MOTIVO DO USO DO FIO	
			VELOCIDADE DE CORTE m ² /h	PRODUTIVIDADE DO FIO m ² /m	NÚMERO DE MÁQUINAS		
Suíça	Ticino	Gneiss	4,0	6,0	2	Rendimento da lavra Nível de produção	
		Granit d'Andeer	5,0	5,0	1		
Itália	Valdossola	Gneiss	3,0 - 4,0	6,0 - 7,0	2	Problemas ambientais Nível de produção	
		Serizzo					
		Beola					
		Rosso Baveno	3,0	4,0	1		
Noruega	Sardègna	Rosso Sardo	3,0 - 4,0	3,0 - 4,0	1	Problemas ambientais-custo	
		Labrador	4,0 - 4,5	6,0	4		
	Larvik	Black					
		Blue pearl	5,0	3,0	1	Rendimento da lavra	
Marina pearl							
Canadá	Quebec	Quartzite	4,0	5,0	2	Rendimento da lavra	
		Anorthosite	2,5 - 3,0	4,0 - 5,0	1	Rendimento da lavra	
França	Vosges	2,0 - 2,5					3,0 - 4,0
	Bretagna						
Alemanha	Limousin	Rose de la clareta	2,0	2,0 - 3,0	1	Rendimento da lavra	
		Gris celtique	2,0	4,0			
		Bleu de gueret					
	Passau	Grey	2,0 - 3,0	4,0	1	Problemas ambientais	
		Bayerischerwald	4,0	4,0 - 5,0	2		
	EUA	Vermont				Barre grey	4,0
Pensylvania		Black					
EUA	Atlanta GA	Grey	5,0	6,0	1	Nível de produção	
		Elberton GA	Grey	4,0	4,5		8
		Raymond	Grey	4,0	4,0 - 4,5		1
		Dakota	Mahogany	2,0	2,5		1
Portugal	Nisa	Grey	2,5	4,0	1	Nível de produção	
Espanha	Madrid	Blanc Castille	3,0	4,0	1		
		Gris Berrocal	1,5 - 3,5	4,0	1		Problemas ambientais - custo
Suécia	Galizia	Rosa porrino					
	Amal	Dahlia res	2,0	4,0	1	Problemas ambientais - custo	

Fonte: THOREAU, B⁽³⁵⁾

FORNARO *et al.*⁽³⁶⁾ estudaram a rocha oficalcita do Vale D'Aosta e na avaliação indicaram o uso do fio com anel de pérola de diamante eletrodepositada lembrando que ele chega a ter qualidade de corte superior ao fio sinterizado. Os autores ressaltam que a segurança e eficiência do emprego deste fio foram obtidas através de estudo no campo e em laboratório. Embora tenha sido estudado o seu uso na família da oficalcita, os pesquisadores afirmam que a parte de interpretação mecânica teórica do processo de corte, bem como a metodologia são extensivas as rochas duras e abrasivas (granito, sienito, diorito, etc.).

BARANA; BIASCO⁽³⁷⁾ descreveram a utilização do fio diamantado nas pedreiras de mármore da região de Piemonte e do Vale D'Aosta apresentando os custos e vantagens em relação as técnicas tradicionais, entre as quais poeira e ruído. A seguir os autores mostram os parâmetros de velocidade de corte para cada tipo de material bem como o desgaste das pérolas dos diversos tipos de fios diamantados utilizados (eletrodepositadas e sinterizadas).

BERRY *et al.*⁽³⁸⁾ destacam o emprego da tecnologia do fio diamantado em rochas carbonatadas, podendo esta ser considerada a mais amplamente utilizada nos mármore, tendo, também agora, o seu uso crescente em rochas silicatadas (granitos). Os autores descrevem a melhor utilização do fio diamantado para ambos os casos, respeitando as restrições de grupos de variáveis e de seus parâmetros. Combinando as tecnologias existentes e os efeitos sobre os resultados técnicos e econômicos da geometria de bancada

com base nos dados totais da mina, valor de mercado da rocha, tamanho da pedreira bem como a quantidade, produtividade e custo de materiais, técnicos envolvidos, além de sua organização periódica no trabalho, foi possível desenvolver um programa de computador de aplicação geral.

BORTOLUSSI *et al.*⁽³⁹⁾ descrevem os estudos de aplicabilidade econômica da tecnologia de corte com fio diamantado para os granitos da Sardenha e alertam para a escolha correta dos diversos tipos de fios encontrados no mercado em função das características do granito. Dessa forma identificando o melhor fio diamantado para o granito em questão a tecnologia de corte poderá ter competitividade de custo operacional para ser empregada de forma integral nas etapas de lavra; particularmente alertam, também, para os fabricantes de fios diamantados melhorarem a qualidade dos elementos abrasivos e revestimentos protetores dos mesmos. Segundo os autores nos últimos 10 anos registrou-se uma constante e contínua evolução na tecnologia de fabricação da máquina e do próprio fio diamantado.

DUARTE⁽⁴⁰⁾ realizou um estudo prático do uso do fio diamantado em maciços rochosos nas jazidas de granito localizadas em Colatina e Santa Tereza no Estado do Espírito Santo, com o equipamento fabricado pela Pellegrine modelo TDD 100, fio da “diamant board”, anéis de pérolas de 11 mm de diâmetro com 40 unidades por metro de fio diamantado. Nos ensaios realizados foram usados dois tipos de fio diamantado com preços diferenciados. A tabela 2.7 mostra o valor médio obtido no final da bateria.

TABELA 2.7 - VALOR MÉDIO OBTIDO COM O USO DO FIO DIAMANTADO EM GRANITOS DE MACIÇOS ROCHOSOS NO ESPÍRITO SANTO

ENSAIOS	BATERIA I	BATERIA II
Nº DE ENSAIOS	33	21
Tipo petrográfico	Granito	Granito
Nome comercial	Granito Bianco Aurora	Granito Verde Kiwi
Velocidade média de corte	6,2 m ² /h	7,5 m ² /h
Rendimento do fio	5,1m ² /m	4,3 m ² /m
Custo do fio a (por metro)	US\$ 500.00/m	US\$ 500.00/m
Custo do fio b (por metro)	US\$ 250.00/m	US\$ 250.00/m
Custo do fio a (m ² de corte)	US\$ 98.03	US\$ 116.27
Custo do fio b (m ² de corte)	US\$ 49.01	US\$ 58.13

Fonte: DUARTE, G. W.⁽⁴⁰⁾

DUARTE⁽⁴⁰⁾ comenta que, nas pedreiras onde os experimentos foram realizados no maciço rochoso, normalmente, a lavra para os cortes primários são feitos com dois tipos de perfuração contínua: perfuratriz “TAMROCK” de diâmetro 2” e perfuratriz “DOWN-THE-HOLE” de diâmetro 5”, além do corte através de “flame-jet”. Assim, foi possível realizar quase que simultaneamente o desenvolvimento da extração e a avaliação de custo/benefício dos diferentes cortes. O objetivo do trabalho restringiu-se somente às observações com a tecnologia do fio diamantado para execução de cortes primários. A partir dos dados obtidos com a experiência o autor pode concluir que: o corte com fio diamantado é a técnica que apresenta melhor qualidade

final no produto da lavra; é a tecnologia que oferece a melhor geometria de corte; limita intensamente o uso de explosivos na mina; é o método mais rápido e limpo; reduz intensamente o nível do ruído, vibração e poeira com relação aos outros métodos utilizados na pesquisa. Porém existe um fator proibitivo na utilização prática do fio diamantado: a análise do custo unitário por metro quadrado de corte. Este limite do custo unitário por metro quadrado é o único impedimento, atualmente, ao grande desenvolvimento de extrações brasileiras com corte com fio diamantado. Contudo, conclui-se que o limite de formação de preço de mercado para o fio diamantado seria em torno de US\$ 150.00/m, o que corresponde ao custo das perfurações com “TAMROCK” e “DOWN-THE-HOLE”, tendo uma grande vantagem na relação custo/benefício total da operação.

Os autores^(5, 12 e 13), confirmam que no caso dos granitos as dificuldades são maiores do que nos mármorees devido a maior abrasividade das rochas silicatadas que levam a um consumo mais rápido do elemento diamantado e também, devido à resistência mecânica, obriga a uma redução considerável na velocidade de corte.

2.2.3.3. “Water-Jet”

CICCU^(5 e 41), BORTOLUSSI *et al.*⁽¹⁰⁾ comentam que a aplicação da tecnologia do “water-jet” a velocidade elevada para o corte de rochas do tipo ornamental é de desenvolvimento recente. Atualmente, o corte com a tecnologia de jato d’água de alta pressão vem sendo utilizado

progressivamente em escala industrial em vários segmentos do setor de rochas ornamentais, já existindo casos de pedreiras nos Estados Unidos, Canadá, França, Itália, entre outros, que deixaram de operar a nível experimental, passando a operar na sua plenitude industrial. Este tipo de equipamento é fabricado na Itália, França e Estados Unidos.

De acordo com SUMMERS⁽⁴²⁾ a técnica de “water-jet”, é aplicável para rochas com textura sacaróide, do tipo granular ou granoblástica. Fundamenta-se na ação de desagregação da rocha por jato d’água gerado através de bombas de alta pressão, onde o corte se processa por arranque (escarificação) dos grãos. O corte por jato d’água tem sido utilizado notadamente para arenitos, considerando-se importante a definição de aplicabilidade para quartzitos e migmatitos, que são rochas muito sensíveis à explosivos.

Os autores^(10 e 28) complementam que a experiência industrial para o corte de rocha, tipo granítica, indica uma pressão do jato d’água operada da ordem de 70 a 270 MPa, sendo a precisão e rendimento proporcionais à pressão. O corte por jato d’água aplicado satisfatoriamente para rochas de gran cristalina bem definida pode atingir altas pressões, em torno de 400 MPa. O jato com bico de diâmetro de 1 mm pode funcionar com água pura ou com água e abrasivos (areias e outros), possuindo uma distância do bico de jato até a rocha que pode variar de 2 até o máximo 10 cm.

Segundo os autores^(13 e 28) o sistema de corte é composto por uma

central de pressurização, uma haste que sustenta o bico e de uma estrutura de suporte. A estrutura de suporte e guia da haste tem a função de regular os movimentos que devem ser executados, uma vez que o corte é regulado por passadas sucessivas. A haste deve translacionar por todo o comprimento do corte e penetrar no sulco produzido, de modo a manter a distância mínima entre o bico e a rocha.

O conjunto funciona de tal modo que a penetração da haste, no final de cada passada, retoma automaticamente o movimento de translação em direção oposta ao precedente. A fim de obter um sulco de largura suficiente que permite a penetração do bico e da haste, uma solução alternativa prevê um movimento rotacional, além dos movimentos de translação e de penetração. As tabelas 2.8 e 2.9 apresentam alguns valores de velocidade de corte e energia específica, em função do diâmetro do bico e da pressão da alimentação ⁽¹³⁾.

TABELA 2.8 - VALORES DA VELOCIDADE DE CORTE EM FUNÇÃO DA PRESSÃO E DO DIÂMETRO DE SAÍDA

Diâmetro (mm)	VELOCIDADE DE CORTE (m ² /h)			
	Pressão de Trabalho (MPa)			
	69	138	207	276
0,254	0,03	0,05	0,08	0,10
0356	0,06	0,11	0,16	0,21
0,508	0,13	0,24	0,34	0,44
1.016	0,55	1,04	1,50	1,95
1.270	0,89	1,68	2,43	3,15
1.524	1,32	2,48	3,59	4,66

Fonte: DIGITA - Universidade de Cagliari

TABELA 2.9 - VALORES DE ENERGIA ESPECÍFICA EM FUNÇÃO DA PRESSÃO E DO DIÂMETRO DE SAÍDA

Diâmetro (mm)	ENERGIA ESPECÍFICA (Kw/m ² /h)			
	Pressão de Trabalho (MPa)			
	69	138	207	276
0,254	88	97	170	200
0,356	84	127	161	191
0,508	80	121	153	182
1,016	72	109	139	164
1,270	70	105	134	159
1,524	68	103	131	155

Fonte: DIGITA - Universidade de Cagliari

AGUS *et al.*⁽⁴³⁾ estudaram a caracterização mínero-petrográfica em algumas amostras de granito americano, submetido a ensaios de corte com a tecnologia “water-jet” e observaram que a maior influência sobre a desagregação da rocha estudada está na dimensão da gran média do granito e na presença de fissuras dispostas no contato intergranular.

RUSSO⁽⁴⁴⁾ comenta sobre a instalação na Itália, em 1993, de um equipamento de “water-jet”, para corte vertical e horizontal, na pedreira em Sarizzo, Foppiano de Formazza, e seu desempenho técnico favorável ao seu uso em relação a outros tipos de tecnologia avançada. Segundo o autor, as características dessa máquina permitem prever que num futuro próximo o corte de granito será feito somente através da utilização de jato d’água em alta pressão e, para a separação da parte talhada da remanescente no maciço, será utilizado algum expansor hidráulico acoplado com amortecedor; a ferramenta de perfuração será usada apenas na preparação final dos blocos.

BORTOLUSSI⁽⁴⁵⁾ estudou a dependência do mecanismo de corte com jato d’água em relação a porosidade do granito de granulação fina da região da Sardenha (Itália) e, verificou com o material estudado, que esta variável independente, é a única dos ensaios e útil para analisar os resultados em termos da porosidade total e sua distribuição na rocha. Segundo o autor existe uma boa correlação entre o resultado do corte e os dados relativos à porosidade; a relação da velocidade superficial de corte e a porosidade relativa aos poros de dimensão inferior a 1 mm é do tipo quadrática. Esta relação confirma a teoria de propagação da fratura, onde é de fundamentall

importância uma análise correta do fenômeno na sua globalidade.

CICCU⁽⁴⁶⁾ chama atenção quanto a aplicação da tecnologia “water-jet” no campo da engenharia de minas, destacando e avaliando as conquistas industriais mais importantes, num formato de estado d’arte. A seguir o autor faz uma avaliação das pesquisas de aplicação industrial e comenta que a tecnologia de jato d’água a alta velocidade pode ser vista como um dos maiores avanços no campo do desmonte de material em virtude de sua flexibilidade inerente e eficiência. Esta aplicação tem sido estendida rapidamente a outros ramos da prática industrial em diversos materiais, desde os macios até os duros.

O autor⁽⁴⁶⁾ lembra que na engenharia de minas, a energia hidráulica foi primeiramente usada para escavar rochas macias, usando monitores de baixa pressão. Com o advento da tecnologia de alta pressão tem sido usada a tecnologia “water-jet” para rochas mais duras, abrindo uma nova era na mineração. A pesquisa foi recentemente ampliada pelo desenvolvimento de jato abrasivo, especialmente para corte de precisão. Segundo o autor, com particular referência a rocha ornamental, os resultados das investigações de laboratório e julgamento de campo, levaram a concluir que o corte com “water-jet” é viável e seguro comparado ao de “flame-jet” e mesmo ao desmonte com explosivo, com vantagens adicionais em termos de engenharia de segurança, automação e impacto ambiental.

De acordo com os autores^(5 e 11), a principal vantagem da técnica com

“water-jet” reside na evidente redução do custo operacional de mão-de-obra que significa a principal incidência das outras técnicas, com exceção do “flame-jet”. Por outro lado, o consumo energético aumenta proporcionalmente ao aumento da potência do sistema. A energia específica (expressa em MJ/m^3), na maioria das vezes é independente da potência aplicada, porém devem ser controlados rigorosamente os parâmetros operacionais, tais como pressão e vazão d’água, velocidade rotacional dos jatos, velocidade de translação, etc. Com tais condições, pode-se estimar cada vez mais crescente a competitividade da tecnologia “water-jet” em relação ao corte com explosivos sob o ponto de vista energético. Se por hipótese considerar um aumento na recuperação da lavra da ordem de 30%, e desenvolvendo a operação a uma velocidade média superficial de corte de aproximadamente $2 \text{ m}^2/\text{h}$ para um tipo de granito, pode estar dentro de faixa de energia hidráulica específica de 8.000 a $9.000 \text{ MJ}/\text{m}^3$, a qual encontra-se em perfeita competitividade com as técnicas tradicionais atualmente empregadas.

As desvantagens residem no aspecto econômico, em função do alto custo do investimento inicial de US\$ 300,000.00 (trezentos mil dólares) variável em função da potência, representado principalmente pela central de pressurização. Os custos energéticos são também altos, devido à elevada incidência do consumo de energia. A fim de se obter um nível de produção comparado ao daqueles que utilizam técnicas de corte tradicionais, torna-se necessário instalar uma central de pressurização capaz de atingir ou superar cerca de 200 kW. Outra limitação que a técnica apresenta é a necessidade de se dispor de uma pedreira com geometria regular nas frentes de lavra. .

Contudo, a maior dificuldade de implantar “water-jet” na indústria reside no elevado número de parâmetros operatórios que afetam a qualidade da superfície final^(12, 13 e 14). A tabela 2.10 mostra alguns parâmetros operacionais da tecnologia “water-jet” em algumas pedreiras de granito dos Estados Unidos, Canadá e França.

TABELA 2.10 - PARÂMETROS OPERACIONAIS EM PEDREIRAS DE GRANITO COM “WATER-JET”

PEDREIRA (Localidade)	POTÊNCIA (kw)	PRESSÃO (Mpa)	VAZÃO (V min)	VEL. DE CORTE (m²/h)
Colorado (USA)	30	310	5	0,6
Georgia (USA)	130	100	60	1.20 - 2.5
S. Dakota (USA)	115	100	41	1.5
Quebec (Canadá)	150	138	76	1.7
França	280	240	60	1.5

Fonte: DIGITA - Universidade de Cagliari

2.2.3.4. Raio laser

MIRANDA⁽⁴⁷⁾ realizou ensaios de laboratório em diferentes mármore de Portugal (Branco Pardal, Rosa de Borba e Ruivina) e num mármore grego (Branco de Thassos). Segundo o autor o processo de corte de rochas por laser envolve um processo térmico que consiste no aquecimento rápido e localizado da rocha, com vaporização e formação de um plasma na zona de interação a densidades de energia da ordem de 10^3 a 10^4 W/cm². O autor complementa que em qualquer das situações testadas, verificou-se que se

comparar um corte por laser com o corte por jato d'água abrasivo de alta pressão, o segundo é mais vantajoso do ponto de vista técnico-econômico, porque permite velocidades de corte cerca de 8 vezes superiores às do laser o que torna o custo/m de corte muito menor.

CRESPO⁽³²⁾ comenta que há muitas especulações sobre a aplicação de raios laser no corte de rochas, no entanto, até o momento nada existe de concreto sobre o assunto e acredita-se que nada venha a ocorrer em futuro próximo, pois para se gerar um laser com poder suficiente para serrar rochas, o processo terá forçosamente que envolver elevado consumo de energia e isto o torna economicamente inviável face aos atuais métodos utilizados. Entretanto, acredita-se que o raio laser não será utilizado como ferramenta de corte, mas sim como um meio orientador do equipamento de furação e corte. Na prática, sabe-se da dificuldade existente na interseção de furos para posterior introdução do fio diamantado e quantas tentativas são necessárias para que haja coincidência dos dois furos. Daí a vantagem de um sistema de emissor-receptor. O emissor seria uma fonte de raio laser que criaria um plano coincidente com o plano dos furos a interceptar. O receptor consistiria em uma ferramenta de furação de corte sendo este obrigado a seguir a trajetória indicada pelo raio laser. Embora já tenham sido realizados alguns ensaios sobre esta técnica, há ainda alguns pormenores para serem desenvolvidos e estudados, tais como, a visibilidade do laser em dias de elevada luminosidade, bem como um método no sentido de obrigar a ferramenta ser seguida pelo raio, já que a técnica ensaiada consistia na orientação manual indicada por efeitos sonoros.

2.2.4. Aplicação da tecnologia mista

BORTOLUSSI *et al.*⁽¹⁰⁾, comentam que a lavra das rochas ornamentais, em particular o granito, geralmente é feita utilizando combinações de diversas tecnologias com o objetivo de maximizar o resultado econômico e conferir a necessária flexibilidade ao ciclo produtivo. No entanto, considerações a critério de racionalidade sugerem o emprego de métodos mais destrutivos, como aqueles baseados no uso de explosivo e do “flame-jet” para a execução dos cortes primários, no que se refere ao destaque da bancada de grande volume, deixando os outros métodos para a subdivisão sucessiva e em particular as operações de retalho e esquadreamento dos blocos. Parece não muito lógico, por exemplo, utilizar o “flame-jet” como uma técnica única para extração direta dos blocos do maciço, enquanto que a proporção do volume utilizável, levando em consideração a extensão da zona danificada, resulta dessa forma inaceitável. Analogamente, sabe-se que é aconselhável evitar o uso do explosivo para subdivisão de volumes inferiores de 40 a 50 m³.

Os autores⁽¹⁰⁾ consideram pouco racional utilizar tecnologias caracterizadas de elevada precisão (fio diamantado e “walter-jet”) para os cortes primários, deixando a qualidade das superfícies do bloco final com o uso de técnicas mais grosseiras, como aquelas baseadas na perfuração para a etapa de acabamento sucessivo. Vale ressaltar que o estabelecimento e a gestão da lavra, bem como a escolha tecnológica, dependem de fatores de natureza diversa (característica da jazida, condições, topografia do lugar, posição geográfica, área para operação, etc.) que possam orientar a escolha

versus soluções diferentes.

Os autores⁽¹⁰⁾ comentam que, o processo produtivo mais freqüentemente usado na Itália consiste no emprego em etapas sucessivas de extração e subdivisão, respectivamente ao destaque do maciço em bancadas de volumes de rocha da ordem 500 a 2.000 m³ e o corte em pranchas de 50 a 100 m³. A seguir, o retalho final dos blocos de volumes de 8 a 15 m³. Para isto, os cortes de abertura são com o “flame-jet” e os cortes primários de bancada, horizontal e vertical, geralmente com o cordel detonante. A subdivisão da bancada em fatias pode ser também executada com explosivo, mas parece preferível recorrer aos dispositivos expansores para não produzir danificações que levem a uma redução excessiva do volume aproveitável. As operações de retalho e esquadrejamento, normalmente, são realizadas com dispositivos expansores. No caso da mina lavrada com tecnologia avançada (fio diamantado e “walter-jet”), parece lógico usar soluções que comportem aplicação integral dos métodos de corte a todas as fases sucessivas de exploração a fim de conservar a superfície do bloco e as vantagens de precisão que estas técnicas oferecem para o corte.

Os autores^(5 e 11) confirmam que os blocos obtidos por meios das tecnologias tradicionais, invariavelmente, apresentam-se com suas faces rugosas, de acordo com a técnica utilizada. Este aspecto incide negativamente sobre o volume comercial do bloco. As dimensões tomadas correspondem ao menor lado de cada face, que por sua vez, vem descontado geralmente de 5 cm e, portanto, o paralelepípedo inscrito possui um volume muito inferior ao

correspondente de todo o bloco. O volume de rocha desprezado, de acordo com o valor de mercado aplicado, pode assumir em alguns casos um valor econômico considerável. O procedimento de valorização se reflete nas operações sucessivas onde a irregularidade do bloco incide desfavoravelmente a começar do transporte que é medido por peso. Melhorando-se o nível de acabamento dos blocos pode-se minimizar tais problemas que refletem diretamente na fase de serragem e polimento, traduzindo-se em um benefício a dividir o produtor dos blocos e o transformador. A tabela 2.11 mostra um quadro de compatibilidade das tecnologias de acordo com os métodos de extração⁽⁵⁾.

MANCINI *et al.*⁽⁴⁸⁾ destacam o cordel detonante e o fio diamantado para o corte primário em rochas duras e analisam os projetos e métodos de exploração, comparando a teoria com a prática, através dos resultados obtidos em algumas frentes de lavras na Itália. Segundo os autores, a tecnologia atual de uso do cordel detonante para o corte primário é econômica, produtiva e flexível, além de ser considerada como uma tecnologia que já atingiu a maturidade necessária, devido ao aperfeiçoamento dos meios técnicos. No entanto não se verifica progresso importante nos explosivos propriamente ditos, apesar do desenvolvimento dos tipos de cordel atualmente encontrados no mercado, mais fáceis de carregar e conectar. No campo da perfuração houve um melhoramento da maquinária empregada e das ferramentas de perfuração avançada que podem promover aumentos significativos da produtividade, porém a técnica permanecerá fortemente dependente da experiência do operador, no que se refere a perícia e

sensibilidade na decisão de locação das superfícies para o corte primário, o qual em regra geral, o corte para separação é independente do método de lavra.

TABELA 2.11 - QUADRO DE COMPATIBILIDADE DAS TECNOLOGIAS DE ACORDO COM OS MÉTODOS DE EXTRAÇÃO

MÉTODO	TECNOLOGIA						
	EXPLO	PC	DMC	FH	FD	FJ	WJ
lavra por bancada							
- cortes primários	XXO	XO	-	X	XOO	XX	O
- cortes secundários	XXO	-	XO	-	XOO	-	O
- esquadrejamento	X	-	XXO	-	O	-	OO
Painés verticais							
- cortes primários	XXOO	-	-	-	-	-	O
- esquadrejamento	X	-	XXOO	-	O	-	OO
Lavra por desmoronamento							
- desmonte	XX	-	-	-	-	-	-
- esquadrejamento	XO	-	XXOO	-	O	-	O
Lavra seletiva							
- desmonte	XXO	-	-	-	-	-	-
- esquadrejamento	X	-	XXOO	-	O	-	OO
Lavra por matacões							
- divisões	XXO	-	XO	-	-	-	O
- esquadrejamento	X	-	XXO	-	-	-	-
Lavra subterranea							

Fonte : CICCUC, R.⁽⁵⁾

Legenda :

EXPLO = Desmonte com substâncias explosivas

PC = Perfuração contínua

DMC = Divisão mecânica através de cunhas

FH = Corte com fio helicoidal

FD = Corte com fio diamantado

FJ = Corte com "flame-jet"

WJ = Corte com "water-jet"

Freqüência de Aplicação :

Perspectivas de Aplicação :

xx Elevada

x Baixa

oo Boas

o Discretas

AGUS *et al.*⁽⁴⁹⁾, realizaram estudos comparativos de caracterização tecnológica em granitos da Itália, fundamentados nas duas tecnologias avançadas: o fio diamantado e “water-jet”. Nestes verificaram a possibilidade da utilização combinada das tecnologias citadas em escala industrial, embora os mecanismos de corte sejam bem diferenciados, dependendo dos parâmetros operacionais e das condições de trabalho. Esse fato, entretanto não impede a possibilidade de uma aplicação combinada. Atualmente as duas tecnologias podem ser trabalhadas conjuntamente de forma eficiente, permitindo superar algumas limitações das tradicionais, abrindo novas perspectivas para a lavra de granito no futuro.

BERRY *et al.*⁽⁵⁰⁾ avaliaram os custos de extração baseados na coleta de dados em escala industrial, de granito de elevado preço comercial, através da combinação das tecnologias avançadas, as quais são: fio diamantado e “water-jet”. Para obtenção do produto desta rocha ornamental usando o método de lavra nas bancadas altas (>8m) foi utilizada a tecnologia do fio diamantado enquanto que “water-jet” foi aplicado apenas na frente de lavra de bancadas baixas. Apesar dos resultados obtidos serem bastante animadores, os quais já mostraram uma idéia nítida de vantagem em relação às tecnologias tradicionais, ainda, estão subordinados à melhoria de vida útil das ferramentas. No caso do fio diamantado, especialmente, o seu revestimento plástico e para o “water-jet” são os bicos que se desgastam, com facilidade.

Os autores^(7, 8 e 50) comentam o caso da utilização da tecnologia de perfuração com explosivo e “flame-jet” em substituição ao fio diamantado e

“water-jet” na extração de granito de elevado preço comercial. Complementam dizendo que isto só é justificado quando são necessários cortes de áreas maiores para o desmonte de grandes volumes, nos quais a quantidade relativa às perdas das rochas é de menor significância. Atualmente custos elevados são facilmente superados, quando do emprego de tecnologia avançada, em rochas de elevado valor comercial para as quais mesmo um pequeno aumento na recuperação da lavra é muito mais lucrativo do que a economia no custo do corte.

2.2.5. Critérios de escolha

Os métodos de lavra podem ser realizados adotando-se diversas técnicas, cuja escolha depende do tipo de rocha, apesar de que nem todas as tecnologias são perfeitamente idôneas e substituíveis em relação aos condicionantes geométricos e as restrições operativas de cada método. Em virtude de um considerável progresso atribuído à expansão da atividade do setor, estão disponíveis diversas soluções integrais ou combinadas capazes de satisfazer as exigências técnicas de produção numa variada gama de situações das pedreiras⁽⁸⁾.

Segundo os autores^(5 e 11), as pedreiras de rochas ornamentais possuem uma certa uniformidade quanto à metodologia e gerenciamento, na condução dos trabalhos. No caso dos granitos, as escolhas técnicas são geralmente direcionadas para tecnologia que realizam cortes baseados na perfuração, onde as opções disponíveis são na realidade muito diferenciadas, seja

tecnicamente, seja pelo método de lavra usado, seja ainda pela organização do trabalho. Um problema interessante a ser analisado é a escolha das dimensões da bancada.

Os autores ^(5 e 11) comentam que normalmente a escolha das dimensões da bancada é feita em base a preferência pessoal do responsável técnico da mina, que podem variar preponderantemente na faixa de 4 a 15 m para a altura, de 6 a 30 m de extensão e aproximadamente de 2 m a largura (na lavra por painéis verticais) e até 6 a 8 m (na lavra por bancada). A determinação da altura da bancada prevalece como a escolha mais importante, pois esta interfere em diversas fases operacionais. A perfuração vertical condiciona a velocidade de avanço da lavra, seja pela precisão no traçado dos furos, seja no desgaste dos elementos responsáveis pela perfuração. Quanto menor a altura da bancada, maior será a velocidade de avanço na lavra. Por outro lado, volumes de rochas que apresentem uma vasta superfície, favorecem a operação de selecionamento dos blocos resultando em um aumento na recuperação da lavra, muitas vezes influenciada pela irregularidade geométrica dos volumes isolados, devido a imprecisão dos furos e rupturas e formações de trincas na derrubada da fatia.

Os autores ^(5 e 11) chamam a atenção para a necessidade de um estudo minucioso, com a ajuda de um computador, para determinar a melhor solução. Uma recente pesquisa demonstrou que a altura em torno de seis metros é ótima para uma bancada cuja pedreira apresenta uma recuperação de lavra superior a 50%, já alturas superiores são aconselhadas para recuperação de

lavra em pedreiras menores.

De acordo com os autores ^(5 e 11), as exigências de minimizar o impacto ambiental induzem as restrições relativas à geometria da pedreira. O impacto visual deve ser o mínimo, principalmente quando se trata de pedreiras de topo ou encosta, exigindo uma mudança na orientação da frente de lavra distinta da principal direção de visão. A colocação do material de bota-fora representa freqüentemente outro impacto ambiental, desfigurando a paisagem existente, daí a necessidade de estudar criteriosamente a colocação do bota-fora em uma posição oportuna, tais como áreas menos visíveis ou depressões, levando em consideração o problema de interferir na acomodação final do material estéril que deve ser ao mesmo tempo eficaz e econômica. Deve-se ressaltar no que se refere a correta escolha tecnológica, que o problema deve ser encarado em bases racionais, através de um confronto entre várias opções disponíveis. A simples experiência prática não é suficiente para deduzir corretamente todos os fatores técnico-econômicos envolvidos, e em muitos casos leva a escolha não adequadas.

CRESPO⁽³²⁾ concorda com CICCU⁽⁵⁾ que atualmente o desenvolvimento da informática veio permitir ao técnico, gestor ou empresário o uso de ferramentas que possibilitam reunir uma grande quantidade de dados para que este possa tomar a decisão mais razoável e ponderada. Com os programas existentes atualmente no mercado, é possível executar planos de lavra assistidos por computadores. No caso da simulação de cortes, entulheiras e programação de desmontes é também possível obter zonas de maior

densidade de fraturação com indicação de atitude (direção e inclinação).

BORTOLUSSI *et al.*⁽⁵¹⁾ mostram os problemas para a escolha da tecnologia de lavra do granito apresentando as diferentes alternativas técnicas e opções gerenciais através de simulação das operações de lavra. A eficiência dessa metodologia é demonstrada na forma de um estudo de caso em pedreira da Sardenha, Itália. No estudo proposto no projeto de organização de pedreira estão previstos a escolha da geometria da lavra (dimensão e orientação das bancadas) a escolha da tecnologia de extração e escala de produção prevista.

BORTOLUSSI *et al.*⁽⁸⁾ apresentam as tabelas 2.12 e 2.13 onde fazem uma revisão compreensiva das tecnologias existentes sendo suas aplicações relativas ao mármore e granito, dependentes das condições técnico-econômicas, de operação das etapas de lavra, incluindo sua localização, bem como das características dos produtos intermediários e finais. Nas tabelas, verifica-se que no caso dos mármore a velocidade de corte média é de 11 m²/h com o custo de corte unitário médio de US\$ 20.00 /m², enquanto que nos granitos a velocidade de corte varia em torno de 4 m²/h, com o custo de corte unitário médio de US\$ 70.00 /m².

**TABELA 2.12 - COMPARAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DAS
TECNOLOGIAS EXISTENTES PARA A LAVRA
DE MÁRMORE**

MODALIDADE OPERACIONAL E PRESTAÇÃO	PARÂMETROS TÉCNICOS					
	EXPLO	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
Custo 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: valor						
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: BORTOLUSSI *et al.* ⁽⁸⁾

Legenda :

EXPLO = Desmonte com explosivo
 FH = Fio helicoidal
 FD = Fio diamantado
 CC = Cortador à corrente
 PC = Perfuração contínua
 CMH = Cunha mecânica ou hidráulica

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

TABELA 2.13 - COMPARAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DAS TECNOLOGIAS EXISTENTES PARA A LAVRA DE GRANITO

MODALIDADE OPERACIONAL E PRESTAÇÃO	PARÂMETROS TÉCNICOS					
	EXPLO	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
Custo 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: valor						
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: BORTOLUSSI *et al.* ⁽⁸⁾

Legenda :

EXPLO = Desmonte com explosivo
 FH = Fio helicoidal
 FD = Fio diamantado
 CC = Cortador à corrente
 PC = Perfuração contínua
 CMH = Cunha mecânica ou hidráulica

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

CICCU⁽²⁸⁾ concorda com BORTOLUSSI⁽⁸⁾ porém ressalta que o rendimento do fio diamantado para rochas silicáticas é muito variado. O autor fez um levantamento dos parâmetros da velocidade de corte e da produtividade do fio, em diferentes pedreiras e, concluiu que nos casos dos granitos, geralmente, o consumo do fio aumenta e a velocidade de corte decresce em função do aumento da quantidade de quartzo na rocha. Dessa forma o desgaste do fio diamantado depende essencialmente do tipo de material a ser cortado e da velocidade de corte, além da tensão aplicada ao mesmo. A tabela 2.14 mostra os resultados da utilização do fio diamantado em diversas minas apresentando diferentes tipos de rochas silicáticas.

CICCU⁽²⁸⁾ complementa chamando atenção para o surgimento das tecnologias avançadas que deverão ser competitivas do ponto de vista técnico- econômico, e que correspondam às necessidades de uma pedreira moderna, onde serão possíveis a implantação do fio diamantado e “water-jet”, que certamente deverão acelerar o processo de substituição nos próximos anos.

2.3. Inovação Tecnológica no Brasil

CHIODI FILHO *et al.*⁽¹⁴⁾ comenta das principais vantagens competitivas do Brasil no setor de rochas ornamentais, frente aos seus mais diretos concorrentes no mercado mundial, refere-se ao enorme potencial geológico para mármore e, sobretudo, granitos, de variados padrões estéticos, homogêneos e movimentados. Segundo o autor essa vantagem competitiva

só poderá ser materializada mediante aprimoramento das bases de trabalho e profissionalização em todos os seguimentos da atividade afetos ao setor, destacando-se o “know-how” adequado para lavra.

TABELA 2.14 - VALORES DO USO DO FIO DIAMANTADO NA LAVRA DE GRANITO, EM DIFERENTES PAÍSES

MATERIAL	MINA	VELOCIDADE DE CORTE (m²/h)	PRODUTIVIDAD E (m²/m)
Pietra serena	Trasimeno	9,0	10
Trachite	S. Fiora	7,0	13
Beola grigia	Valdossola	4,5	8
Gneiss Ticino	Svizzera	4,0	5,5
P. di Luserna	Piemonte	3,5	10
Serizzo	Valdossola	4,0	5,5
Granito rosa	Baveno	6,0	3,5
Ghiandone Limbara	Gallura	3,5	6
Grigio Sardo	Buddusò	3,5	5
Grigio Perla	Buddusò	1,5	6
Labrador chiaro	Norvegia	5,0	9
Labrador scuro	Norvegia	6,0	16
Baltic Brown	Finlandia	4,0	7
Finnish Black	Finlandia	5,0	8,5
Granito Passau	Germania	1,5	3,5
Gneiss	Svezia	5,0	5,5
Grigio Vosges	Francia	4,0	9,5
Granito Lanhelin	Francia	4,0	6
Granito Porrino	Spagna	3,0	5,5
Grigio Quintana	Spagna	6,0	4,5
Elberton Grey	USA	4,0	6
Canadian Black	Canada	5,0	10,1
Impala Black	S. Africa	6,0	9

Fonte : CICCUI, R⁽²⁸⁾

CARANASSIOS *et al.*⁽⁵²⁾ observam uma considerável expansão da indústria de rochas ornamentais no Brasil, nos últimos anos, com o surgimento

de novas empresas, algumas até totalmente verticalizadas, com experiências trazidas de outros setores, as quais vêm gradativamente implementando sistemas produtivos e novos conceitos para o setor, principalmente na transformação da matéria-prima. Tais conceitos e metodologias largamente empregados e consagrados na indústria de modo geral, em muitos casos devem ser revistos quando se está diante de um setor caracterizado por peculiaridades, visto que a essência da matéria-prima (rocha ornamental) provém da natureza. O fenômeno de aparição de novas empresas e a preocupação dos órgãos públicos junto à indústria das rochas ornamentais se deve a grande atratividade existente neste setor, movimentado pelas possibilidades de lucros consideráveis diante de um quadro de abundância de reservas, o qual vem reforçado pela crescente conscientização de implementação de uma mentalidade ecológica levando a uma diversificação e expansão na utilização dos elementos naturais. Assim sendo, acredita-se que o atual momento é extremamente favorável para o desenvolvimento da indústria de mármore e granito em função do surgimento de um binômio que cada vez se torna mais significativo: produzir competitivamente e com qualidade.

Os autores⁽⁵²⁾ alertam que para ocorrer o desenvolvimento e competitividade da indústria brasileira de rochas ornamentais não basta somente dispor de equipamentos de alta tecnologia e sofisticação, mas é de fundamental importância a transferência e a aplicação dos conhecimentos técnicos e científicos alcançados ao longo dos anos no que se refere aos problemas de identificação das reservas, introdução de metodologias que

racionalizem a atividade produtiva, escolha de tecnologias adequadas, formação de recursos humanos nos diferentes níveis, valorização e agregação dos materiais e garantia de qualidade, unidas a uma política comercial, eficaz e abrangente. Diante de uma crescente demanda do mercado internacional não se tem observado um correspondente desenvolvimento no processo de inovação da atividade extrativa primária, a qual se encontra ainda ligada às tecnologias tradicionais de extração.

CARANASSIOS *et al.*⁽⁵³⁾ chamam atenção para o caso da lavra de granitos em matacões sobre dois aspectos que se tornam mais evidentes: o primeiro diz respeito aos fatores relativos à homogeneidade do material e aos níveis produtivos alcançados; o segundo, dentro do enfoque das tensões de origem genética, ou estruturalmente associados à ocorrência de matacões graníticos, que tenderão a sofrer uma dissipação progressiva no tempo geológico e, dificilmente, existirão tensões residuais quando de seu aproveitamento industrial. Daí, nota-se a acentuada preferência pela lavra de matacão em função da ausência de eventuais problemas associados às técnicas ou às fraturas de alívio decorrentes de tensões.

Segundo os autores⁽⁵³⁾, contrariamente, a lavra de rochas ornamentais no maciço oferece possibilidades de manutenção de elevados níveis de produção, permitindo extrair-se blocos de rochas dentro de uma padronização do material tanto qualitativa quanto estética. Neste caso, entretanto, verifica-se com muita intensidade, a influência do estado de tensões do maciço. Este em função da quantidade de energia por elas acumulada, geralmente, pode

apresentar trincas e fissuras no material, como conseqüência do alívio dessas tensões que, em última instância, será sempre propiciado pela lavra. A magnitude dessas tensões no maciço tem influenciado seu sistema produtivo, levando em alguns casos a uma redução significativa na recuperação da lavra, ao mesmo tempo em que compromete a sanidade do bloco de rocha produzido. Nota-se que no seguimento produtivo, tem sido realizado esforços para desenvolver e aperfeiçoar as técnicas de extração. As tecnologias avançadas de corte têm se mostrado eficientes na elevação da recuperação e na melhor preservação da integridade física da rocha durante o processo de isolamento dos blocos, uma vez que existe a eliminação quase total do uso do explosivo.

Os autores⁽⁵³⁾ comentam ainda, que os estados de tensão nos maciços podem ser avaliados através do uso de equipamentos específicos, e consideram como de maior aplicação e mais adequados ao caso de rochas ornamentais, os equipamentos chamados “cilindros sensíveis” aplicados com a técnica de sobre-furação, tendo em vista que podem ser posicionados em diferentes profundidades em relação às superfícies expostas e nas direções consideradas mais convenientes. Existem desses equipamentos desenvolvidos por centros de pesquisa americanos, canadenses, portugueses, sul-africanos, etc. Outra técnica muito importante, derivada de fenômenos identificados há mais de quarenta anos e que só agora começa a dar seus efeitos através de inúmeros estudos que se multiplicam em todo o mundo, é da emissão acústica ou efeito “KAISER”. Esta metodologia permite que, através de ensaios de laboratório sobre amostras orientadas do maciço, se determinem as

componentes de tensão no espaço tridimensional. As conclusões para a solução do problema das fraturas de alívio, nos métodos de lavra que empregam técnicas de corte contínuo, consistem em saber quais as dimensões dos painéis ou blocos que podem ser liberados tridimensionalmente sem que sua expansão volumétrica implique no aparecimento das trincas indesejáveis.

Os autores⁽⁵²⁾, de modo a evidenciar o confronto das possibilidades que podem oferecer as tecnologias avançadas em comparação com as tradicionais, realizaram um estudo com uma pedreira de um anortosito situada em Colatina, no Estado do Espírito Santo. O material extraído dessa pedreira é conhecido comercialmente como Preto São Gabriel que, do ponto de vista mínero-petrográfico, trata-se de uma rocha de coloração escura, com estrutura hipidiomórfica equigranular e de granulação fina. A atividade de extração é desenvolvida por dois métodos de lavra distintos e de duas diferentes combinações de tecnologias. O método de lavra de matacões é realizado através de operações de separação com cargas progressivas de pólvora negra, seguido do esquadrejamento dos blocos, aproveitando os planos naturais de separação da rocha e sucessivos cortes através de perfuração e divisão por cunhas. Na lavra do maciço é empregado o método de bancadas baixas, onde a altura da bancada corresponde a uma das dimensões do bloco, utilizando-se o fio helicoidal para realização dos cortes horizontais combinados com a técnica de separação por cunhas para os cortes verticais. Neste caso a utilização do fio helicoidal é ainda tecnicamente possível pelo fato da rocha ser relativamente macia por possuir pouco quartzo (máximo 5%), podendo ser

cortada com relativa facilidade, mesmo com o uso de areia, enquanto que granitos mais duros e abrasivos necessitariam do carborundum cujo preço é extremamente elevado.

CARANASSIOS *et al.*⁽⁵²⁾ ressalta que na pedreira do Preto São Gabriel, existe a possibilidade de conversão industrial representada pela substituição das tecnologias tradicionais atualmente empregadas (fio helicoidal, perfuração e divisão por cunhas), por uma oportuna combinação de tecnologia avançada (fio diamantado e cortadeira a corrente diamantada). Estas técnicas representam uma solução inovadora, permitindo acelerar os tempos de execução das operações de corte, com significativo aumento da produtividade e redução dos custos unitários. Os resultados técnico-econômicos comparativos efetuados demonstram que embora exista um baixo custo da mão-de-obra no Brasil, o que tenderia a favorecer a situação atual, a alternativa proposta é capaz de assegurar melhores margens econômicas e de incrementar a ocupação, além de melhorar substancialmente a qualidade da produção. A avaliação da viabilidade econômica de conversão de tecnologia para o caso do Preto São Gabriel pode ser estendida para outros casos de pedreiras de granito no Brasil.

STONE WORLD⁽⁵⁴⁾ cita as modernas tecnologias associadas, atualmente utilizadas em minerações de rochas ornamentais de diversos países e comenta os estudos realizados no Brasil, através das empresas localizadas na Bahia, com excelentes resultados de produtividade e qualidade. De acordo com os engenheiros destas empresas, a perfuratriz "TAMROCK" é

usada para extrair o granito Kashmir Bahia numa velocidade de corte de 1,2 m²/h. Este equipamento é também usado em outros tipos de granitos, juntamente com o equipamento de fio diamantado, fabricado pela Pellegrini modelo TDD-100, com uma velocidade de 1,5 m²/h, onde segundo eles afirmam, garantem a eficiência desejada.

CHIODI; ONO ⁽⁵⁵⁾ descrevem detalhadamente os diversos tipos de lavras de rochas ornamentais atualmente empregadas no Brasil (Espírito Santo e Minas Gerais). Os autores chamam atenção que as técnicas e equipamentos de lavra, bem como os custos operacionais, foram desenvolvidos, para mármore e granitos homogêneos, sendo necessária uma adequação de procedimentos para as rochas migmatíticas, que tipificam granitos movimentados.

DUARTE ⁽²⁶⁾ descreve, sucintamente, o setor de rochas ornamentais no Brasil abordando as atividades extrativas dos Estados do Espírito Santo, Minas Gerais e Bahia, especificamente, relacionados aos métodos de lavra e tecnologias utilizadas, condicionando as operações de extração ao custo e escala de produção na mina. O autor complementa dizendo que o setor de rochas ornamentais no Brasil precisa produzir materiais de boa qualidade e ser competitivo no mercado utilizando as tecnologias de lavras adequadas ao tipo de jazimento.

KOPPE *et al.* ⁽⁵⁶⁾ comentam que cresce no Brasil, nos últimos anos, a preocupação com a preservação do meio ambiente e, em particular a lavra de

rochas ornamentais, face às suas peculiaridades, gerando alguns impactos ambientais, sobre tudo a degradação física do meio ambiente que reflete em forte impacto visual. Os autores realizaram um estudo de impacto ambiental de uma pedreira tradicional do ramo, localizada em Viamão, no Estado do Rio Grande do Sul, a cerca de 30 Km de Porto Alegre. No projeto de recuperação ambiental da jazida do granito, de nome comercial Colorado Gaúcho, foi realizado inicialmente, o diagnóstico ambiental e a partir destas informações foi efetivada a avaliação do impacto ambiental. Após a análise dos dados foi elaborado o projeto de lavra a ser empregado, compatibilizando a evolução dos trabalhos mineiros com a integridade de determinados locais considerados como de preservação ambiental. A seguir, foram estabelecidas todas as medidas mitigadoras, envolvendo a recuperação das áreas degradadas e a adequação paisagística das mesmas, bem como os procedimentos necessários para implantar as demais medidas de controle ambiental e recuperação das áreas degradadas e fauna associada.

VIDAL⁽²⁷⁾ descreve o setor de rochas ornamentais do Estado do Ceará, em estudo realizado em 1995, enfocando, principalmente, a situação inerente à parte extrativa, através de análise de campo nas jazidas e/ou minas. Para tanto dividiu o Estado em três porções distintas: região Norte, região Centro e região Sul, no universo para análise, composto de um total de 40 pedreiras pertencentes a diferentes empresas, distribuídas por todo Estado. No estudo verificou-se uma maior concentração de jazidas na porção Norte do Ceará que indubitavelmente é a região de maior reserva de granito com cerca de trezentos milhões de metros cúbicos. Como exemplo podem ser citados

dentre outros o granito Asa Branca, Rosa Iracema, Red Symphony, Yellow Symphony, Verde Ventura, Meruoca Clássico, Vermelho Filomena, Verde Meruoca, Casa Blanca, Verde Pantanal, Cinza Prata, Amarelo Santa Quitéria, Amarelo Massapê, também conhecido comercialmente como Amarelo Meruoca e Mel Meruoca.

VIDAL⁽²⁷⁾, faz uma avaliação dos resultados obtidos, em função da comprovada potencialidade geológica do Ceará para ocorrência de granitos e rochas afins com características ornamentais. O autor observa que o setor de rochas ornamentais teve nos últimos anos um crescimento acelerado no Estado, sem que houvesse, contudo, uma compatibilização em relação à adequação de uso dos materiais produzidos. Segundo o autor o conhecimento tecnológico adequado destes materiais é útil, uma vez que pode conduzir a um aproveitamento mais racional, auxiliar nas operações de lavra e beneficiamento e ainda indicar o produto obtido de conformidade com as normas para seu uso e aplicação. A falta desse conhecimento pode acarretar problemas de caráter técnico e baixa qualidade do material produzido e desse modo, torna-se imperiosa a necessidade de pesquisa geológica e ensaios tecnológicos das rochas ornamentais. Por outro lado, no que se refere a viabilização de jazidas e conseqüentemente a escolha do método de lavra adequado, o Estado do Ceará é ainda incipiente, e isso se torna mais acentuado quando a jazida está sendo explorada. Pôde-se observar, em virtude da grande disponibilidade das reservas de rochas ornamentais, uma tendência a metodologia adotada na extração baseada na lavra de matacões. Esse tipo de lavra, que envolve técnicas de grande simplicidade operacional,

apresentou muitos problemas para as empresas de mineração do Estado no que se refere a produção e qualidade desejadas.

O autor⁽²⁷⁾ comenta que no Ceará, em muitos casos, seria possível obter na lavra uma produção maior e com boa qualidade. O nível de recuperação nas etapas de lavra é muito baixo e isto pode ser melhorado através do planejamento e da utilização de tecnologias de lavra mais adequadas, as quais permitiriam uma produção de blocos melhores esquadrejados, com reflexos imediatos na produtividade da operação de serragem. Houve no Ceará uma evolução muito rápida na fase de elaboração do produto final na tecnologia de beneficiamento, com objetivo de conseguir maior competitividade no mercado internacional de produto acabado. Agora observam-se problemas na cadeia produtiva desde a pesquisa mineral até a extração de blocos, lavra propriamente dita. No Ceará, existe a lavra em matacões que é praticada, na sua maioria, pelas pequenas empresas e a lavra em maciços rochosos, destacando-se entre outras as pedreiras dos granitos Asa Branca, Rosa Iracema, Casa Blanca, Red Symphony, Yellow Symphony, Meruoca Clássico, Vermelho Filomena e Cinza Prata. No beneficiamento, existem em operação cerca de 42 teares e 5 talha-blocos onde nas empresas beneficiadoras, podem ser encontrados linhas modernas de corte e polimento da BRETON, ZONATO, SIMEC, HENSEL, CIMEF, entre outras.

Segundo Vidal⁽²⁷⁾, o potencial do Estado do Ceará na área de granito é incomensurável. Considerando a produção oriunda das áreas visitadas, em torno de 2500 m³/mês de blocos elaborados, observou-se que a produção de

chapas de 2 cm de espessura é da ordem de 82.000 m²/ mês (na relação de trinta e três metros quadrados de chapas por metro cúbico de bloco), o que supera em muito a produção de material acabado que foi 50.000 m²/mês nos últimos dois anos (1995-1996). Este fato comprova uma grande demanda de blocos de granitos do Ceará para outros mercados. Por outro lado, considerando a capacidade instalada do polo de granito cearense de produzir cerca de 80.000 m²/mês de chapas, observou-se, também, que a produção oriunda das frentes de lavra para fornecimento dos blocos está muito aquém da capacidade do parque industrial de beneficiamento, fazendo com que seja necessário a importação de granitos de outros Estados, como Espírito Santo, Minas Gerais, Bahia, Paraíba e Rio Grande do Norte.

O autor⁽²⁷⁾ comenta que no Ceará existe uma grande variedade de tipos de rochas subdivididas por classes em função das suas características petrográficas/mineralógicas, bem como os índices físicos e mecânicos. Particularmente no Ceará existem depósitos graníticos constituídos de rochas que apresentam características de composição muito peculiares (como exemplo o granito Asa Branca). O uso da tecnologia avançada de corte baseada na utilização de ferramentas diamantadas representa uma solução inovadora, a qual permite mudar o tempo de execução das operações de lavra, tendo em vista o aumento da produtividade e redução dos custos unitários.

VIDAL⁽²⁷⁾ complementa dizendo que para o Estado do Ceará ser plenamente competitivo é necessário que o empresário cearense venha a investir também na modernização da lavra e se preocupar, principalmente, no

que se refere à pesquisa mineral. O autor observou que o setor foi muito prejudicado pela falta de formação dos recursos humanos envolvidos na atividade de extração. Muitos profissionais da área de mineração (geólogos e engenheiro de minas), por exemplo, às vezes não sabem que os problemas da lavra de uma rocha ornamental são diferentes dos de uma lavra típica. Segundo o autor, isto é um aspecto a ser revisto, porque há uma carência profunda de profissionais especializados, bem como de informação técnica prejudicando o desenvolvimento do setor.

Segundo VIDAL⁽²⁷⁾ o estágio atual das rochas ornamentais do Ceará sofre pelos erros iniciais dos empresários que, geralmente, não possuíam a cultura minerária e deixaram de cumprir o processo de desenvolvimento progressivo, incluindo as necessárias etapas de investigação. Dessa forma, o entusiasmo inicial impediu que fossem tomadas as precauções importantes para reduzir o risco típico das atividades de mineração, através da realização de pesquisas geológica, tecnológica e de mercado, imprescindíveis para a pré- viabilidade econômica do empreendimento na elaboração dos projetos de lavra e beneficiamento. Consequentemente algumas empresas estão passando por dificuldades e aquelas ainda em atividade trabalham com organização precária, sob pressão da procura comercial, que não permite a reorganização e a reestruturação de suas atividades visando a adequação tecnológica.

Finalizando, o autor⁽²⁷⁾ constatou que as novas empresas que agora se encontram na fase de abertura de jazidas podem ter a vantagem de não cometer erros praticados pelos iniciantes da industrialização do granito no

Ceará. Podendo dessa forma, enfrentar as diferentes etapas da atividade de mineração, cumprindo as tarefas necessárias com a devida prudência nos investimentos e desenvolvendo um planejamento racional a médio e longo prazo.

3. FUNDAMENTOS CIENTÍFICOS

Segundo WILKS; WILKS⁽⁵⁷⁾ o diamante é considerado um material raro, pelo menos há mais de 2.000 anos, comumente encontrado nos cascalhos dos leitos dos rios e usado como pedra preciosa por suas características de alto índice de dureza, brilho, transparência e beleza, sendo que quando incolor atinge seu maior valor de comercialização. Geralmente não é atacado por nenhum reagente químico, mas quando é atingido por altas temperaturas ocorre corrosão sobre suas faces, devendo-se tomar algumas precauções.

Somente a partir de 1870, com a descoberta das jazidas africanas, nos cascalhos do Rio Vaal, na África do Sul, a produção mundial de diamante foi aumentada significativamente, possibilitando seu uso, não só como pedra preciosa, mas também, para corte de rochas e outros materiais.⁽⁵⁷⁾

No início do século evidências geológicas demonstraram que os diamantes se formam a grandes profundidades sob condições de temperatura e pressão muito elevadas. Portanto para se obter o diamante sintético é necessário reproduzir, artificialmente, o ambiente de sua formação⁽⁵⁷⁾.

WILKS; WILKS⁽⁵⁶⁾ comentam que a curva de Berman-Simon, figura 3.1, indica as duas formas alotrópicas em equilíbrio termodinâmico do carbono, em função da pressão e temperatura. A curva mostra que elevando a pressão na temperatura ambiente é possível obter o diamante a partir do grafita. Por outro lado a curva mostra, também, que o diamante não fica estável à temperatura

ambiente, necessitando altas pressões para se obter a estabilidade termodinâmica. Com esta descoberta verificou-se a possibilidade da sinterização industrial do diamante.

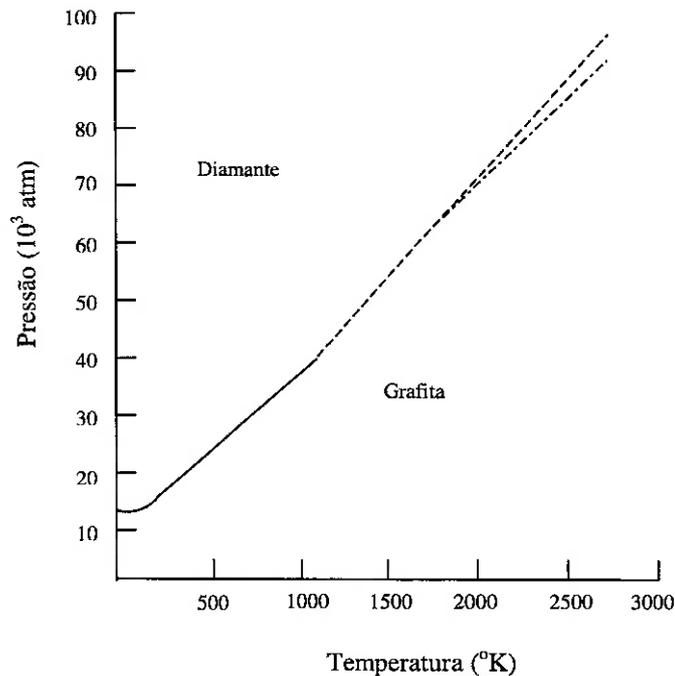


FIGURA 3.1 – CURVA DE EQUILÍBRIO ENTRE O DIAMANTE E A GRAFITA

Fonte: WILKS; WILKS⁽⁵⁷⁾

Foi quando, em 1955, a General Electric Company, produziu os primeiros diamantes sintéticos, não sendo apropriados para serem lapidados como gemas. A partir dessa data outros pesquisadores desenvolveram experiências na fabricação do diamante por outros processos tecnológicos demonstrando a possibilidade de produzir gemas de boa qualidade apesar do custo elevado. Contudo estão sendo produzidos, para fins industriais, diamantes sintéticos em competição com os pequenos diamantes naturais, que corresponde, atualmente, ao triplo do diamante natural⁽⁵⁷⁾.

3.1. Propriedades do Diamante

3.1.1. Estrutura do diamante

- Impurezas no diamante

As análises químicas de diamantes naturais ou sintéticos são as mesmas quanto à natureza do elemento químico (análise qualitativa) bem como a sua concentração. Embora as técnicas empregadas possam detectar e quantificar o elemento químico a sua localização exata no cristal fica desconhecida. Os diamantes naturais e sintéticos são avaliados por diferentes métodos de análise, porém a grande maioria dos resultados obtidos está relacionada aos diamantes naturais, os quais, geralmente, contêm uma variedade maior de impurezas. O diamante ideal consiste, teoricamente, de uma rede de átomos de carbono, formando um cristal incolor e límpido, porém os cristais verdadeiros apresentam cor e pontos escuros espalhados por ele. Estas características físicas visuais são classificadas como: ⁽⁵⁷⁾

a) inclusões de outros materiais alheios e introduzidos durante a formação do cristal de diamante;

b) colorações provocadas por átomos diferentes do carbono (impurezas) que se encontram dentro do diamante;

c) defeitos localizados nos espaços vazios dos diamantes quando livres

das inclusões que muitas vezes contêm gases ou os seus condensados ou, ainda, espaços vazios entre as inclusões e o diamante adjacente.

Segundo o autor⁽⁵⁷⁾ para se determinar as impurezas do diamante são utilizados vários métodos de análises físico-químicas, das quais se destacam análise por vaporização, microsonda e ativação nuclear.

-Os elementos químicos nas impurezas do diamante:

Segundo BIBBY apud WILKS; WILKS⁽⁵⁷⁾ os métodos de análise química empregados não conseguem informar se os átomos das impurezas são oriundos das inclusões ou se eles estão incorporados de algum modo no diamante. Para se ter a distribuição espacial dos elementos químicos no diamante, necessariamente, obtem-se dados a respeito dos métodos de análises químicas empregados, além da concentração observada e o número de diamantes analisados.

Segundo WILKS; WILKS⁽⁵⁷⁾ esse trabalho foi feito por Bibby (1982) em diamantes naturais, que obteve uma estatística de todos esses elementos. Desse modo é possível verificar que existem três conjuntos de elementos químicos a saber: o conjunto dos elementos H, N, O e S na concentração de 1 a 1000 ppm por pêso; o conjunto dos elementos B, Mg, Al, Si, S, Ca, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Ag e Ba na concentração de 0,1 a 100 ppm e o terceiro conjunto que consiste de um grande número de elementos metálicos com concentrações na ordem de 10^{-6} a 10^{-1} ppm, podendo as concentrações

serem ainda menores quando existem inclusões de elementos pesados.

De acordo com FESQ e SELLSCHOP apud WILKS; WILKS⁽⁵⁷⁾ o segundo conjunto de elementos faz parte da composição química das inclusões nos diamantes. Desse modo eles verificaram a existência de correlação entre a massa desses quinze elementos encontrados num dado diamante, sendo identificada forte correlação entre os elementos mais comuns das inclusões de minerais, por exemplo, entre o Mn, Al e Mg. Portanto, por intermédio dessas análises foram verificadas diferenças acentuadas na constituição dos diamantes.

- Inclusões perceptíveis pela visão

a) Tamanho e geometria

As inclusões em um diamante podem ser vistas quando observadas pelas faces naturais do diamante. No caso das inclusões serem opacas ou localizadas de forma inconveniente, as mesmas só podem ser observadas quando forem polidas as faces planas. Estas inclusões serão classificadas como singenética, protogenética e epigenética, dependendo de como se formarem no diamante, que poderão ter o hábito cristalino tipicamente do mineral de que é formada ou o hábito imposto pelo diamante que o hospeda. Às vezes se encontram disseminadas em forma de pó mineral na periferia da superfície, nas fraturas subsuperficiais em torno de inclusões singenéticas mais recentes, e como mineral em planos de clivagem ou de fratura

interceptando a superfície do diamante⁽⁵⁷⁾.

A aparência de uma gema de diamante é dependente das inclusões, as quais absorvem a luz no cristal, sendo uma inclusão escura mais depreciativa do que uma clara ou transparente, e da posição das mesmas com relação às trajetórias de luz refletida internamente, em torno do diamante. Comercialmente uma gema é considerada sem inclusões quando essas não são encontradas através de uma lente com magnitude de ampliação de 10 vezes⁽⁵⁷⁾.

De acordo com HARIS, HAWTHORNE e OOSTERVELD (1984) apud WILKS; WILKS⁽⁵⁷⁾ a quantidade de inclusões em um diamante varia de uma mina para outra. Os autores pesquisaram diamantes em duas diferentes minas de Kimberley e constataram, através de análises, que numa batelada de 1500 diamantes de tamanho de 2 mm cada, foram obtidos, na primeira mina, 89 diamantes com inclusões, enquanto que na segunda mina foram encontrados 320 diamantes com inclusões. Recomenda-se todo cuidado com as inclusões nos diamantes industriais, pois basta haver inclusões juntas ao fio da ferramenta de corte para que a sua ação fique prejudicada. Portanto, torna-se necessário uma inspeção mais apurada, empregando-se lentes com magnitude de 50 ou 100 vezes de aumento. Como já foi dito, as inclusões no diamante são minerais iguais aos que ocorrem na crosta terrestre, tais como as inclusões que ocorrem no kimberlito que é a rocha encaixante do diamante de Kimberley, África do Sul.

b) Constituição das inclusões

WILKS; WILKS⁽⁵⁷⁾ comentam que na análise para detecção das inclusões microscópicas do diamante vários autores descreveram as técnicas por eles empregadas, tendo descoberto distorções, e deslocamentos na rede cristalina do diamante bem como o desenvolvimento de camadas de aparência semelhante a nuvens.

Segundo HARRIS e GURNEY apud WILKS; WILKS⁽⁵⁷⁾ foram observadas, através do microscópio polarizante, inclusões contidas na rede cristalina do diamante que formam um cristal, com birrefringência oriunda de distorções impostas pelas inclusões, permitindo que o feixe luminoso de luz branca seja transmitido de uma face a outra do cristal. Com esta técnica é possível revelar a presença de inclusões com cerca de 0,5 μm de tamanho, sendo, portanto, uma técnica com maior poder de detecção do que com o microscópio comum.

Embora a microscopia eletrônica seja uma ferramenta poderosa, o seu emprego no estudo dos diamantes naturais tem sido pouco utilizado pela dificuldade de se preparar a amostra na espessura certa a ser analisada ou pela imensa variedade de inclusões apresentadas, tornando-se uma tarefa muito trabalhosa⁽⁵⁷⁾.

Segundo WONG *et al.* (1985) apud WILKS; WILKS⁽⁵⁷⁾ a microscopia eletrônica também tem sido utilizada na análise dos diamantes sintéticos para

determinação de inclusões de tamanhos submicroscópicos do metal catalisador destes diamantes.

De acordo com LANG (1979), WOODS (1976), EVANS e PHAAL (1962) citados por WILKS ; WILKS⁽⁵⁷⁾, foram também distinguidas plaquetas (defeitos) com tamanhos desde alguns nanômetros até alguns micrômetros. Esses defeitos têm a forma de discos delgados e o plano do disco coincide com um dos planos dos cubos da rede cristalina. Os defeitos são causadores de distorções na rede cristalina. Há controvérsias quanto à natureza dessas plaquetas pois, enquanto alguns pesquisadores afirmam ser de um ou dois planos de átomos de nitrogênio, outros afirmam que não. Foram observados também espaços vazios de forma octaédrica com uma rede de pontos dentro dos mesmos. Segundo HIRSCH *et al.* apud WILKS; WILKS⁽⁵⁷⁾, isto se devia a presença de átomos de nitrogênio; mas, segundo BARRY apud WILKS; WILKS⁽⁵⁷⁾ a análise da energia do espectro de raios-x emitido pela ação do feixe eletrônico, demonstra que a estrutura dessas formas são mais parecidas com as do interior desses espaços vazios, quando contém amônia sólida, sob alta pressão; contudo HIRSCH *et al.* apud WILKS; WILKS⁽⁵⁷⁾, sugerem uma fase nova de nitrogênio.

3.1.2. Morfologia do diamante

ORLOV (1977) apud WILKS; WILKS⁽⁵⁷⁾ descreveu a morfologia dos diamantes tanto naturais como sintéticos, apresentando uma variedade de formas cristalinas, sendo predominante, para os naturais, a forma octaédrica.

Segundo ele somente um pequeno grupo possui forma geométrica ideal, simétrica, de faces planas iguais e com arestas bem definidas. Essas formas desenvolvidas e inerentes da rede cristalina, originaram-se pelas ligações covalentes carbono-carbono, de acordo com as condições prevalecentes na crosta terrestre. No caso do diamante sintético, este é fabricado com a forma permitida pelo equilíbrio físico-químico, e ainda pela influência do metal catalisador, reproduzindo-se desse modo as condições de pressão e temperatura da formação do diamante natural, cujas formas mais permitidas são as cúbicas, cúbico-octaédricas e octaédricas e, também, a forma dodecaédrica, próxima da linha de equilíbrio diamante-grafite da curva de Bertram-Simon, (figura 3.1).

A presença de impurezas pode produzir efeitos significativos quanto a forma do diamante, modificando o aspecto cristalino. Portanto, na produção do diamante sintético é de se esperar uma variedade de formas com cristais imperfeitos ou tão perfeitos quanto os naturais, possuindo, por vezes, um teor de impurezas menor do que o diamante natural. Ainda ocorrem diamantes naturais com tipos de crescimento fibrosos e revestidos, geminados e irregulares. ⁽⁵⁷⁾

3.1.3. Propriedades físico-mecânicas

-Dureza

De acordo com WILKS; WILKS a dureza é também uma das

propriedades estudadas que inicialmente foram relacionadas ao diamante natural, sendo testada a resistência à fraturas, fadigas, deformação e atrito. PHEAL (1965) citado por WILKS; WILKS⁽⁵⁷⁾ demonstra, através de ensaio de dureza Vickers na temperatura de 1800 °C, que o diamante apresenta comportamento plástico. Verificou-se, ainda, o aparecimento de linhas de deslizamento as quais, também, se desenvolveram quando DEVRIES citado por WILKS; WILKS⁽⁵⁷⁾ submeteu pequenos cristais de diamantes, envolvidos em pó de diamante, a elevadas pressões e temperaturas. Segundo KOCH, DEVRIES e LEE (1986) também citados por WILKS; WILKS⁽⁵⁷⁾, as linhas que surgiram nas superfícies dos cristais apresentam indícios de planos de deslizamento ou deformação laminar. O estudo da dureza do diamante foi realizado em temperaturas abaixo da temperatura ambiente, o que tornou possível observar seu comportamento plástico.

Segundo BAKUL, LOSHEK e MALNEV (1978) apud WILKS; WILKS⁽⁵⁷⁾ a dureza no diamante é inversamente proporcional à temperatura. No que se refere a resistência mecânica, o comportamento do diamante sintético de boa qualidade é muito semelhante ao diamante natural de qualidade. Os diamantes sintéticos de qualidade inferior se comportam diferentemente, uma vez que as inclusões enfraquecem o diamante, até mesmo o de origem natural.

-Abrasão

Com base na literatura, sabe-se que a face do diamante que não apresenta luminescência é mais resistente à abrasão. A direção de suas faces

é outro fator a ser considerado na realização do ensaio, pois quando testadas pelo método de micro-abrasão, eles demonstram ser extremamente sensíveis à orientação cristalográfica da superfície do diamante. No emprego de ferramentas de corte devido à sua elevada resistência à abrasão, a utilização do diamante fica restrita a trabalhos delicados e de precisão.

-Atrito

Nos trabalhos realizados por FREEMEN (1984) e FREEMEN ; FIELD (1989) referenciados por WILKS; WILKS⁽⁵⁷⁾ são citados os experimentos para a determinação do coeficiente de atrito. Para a realização dos mesmos foi empregado um estilete marcador tipo Knoop de diamante policristalino que deslizava sobre superfícies delgadas de aço D3A duro e recozido. Os autores demonstram o coeficiente de atrito de vários pares de materiais como uma função dos ciclos de ensaios. Na avaliação do emprego do diamante é preciso considerar o possível desenvolvimento de uma fase secundária quando são sinterizados com alta pressão, onde a porosidade e as impurezas influem na eficiência da máquina de corte. Com a técnica de obtenção do policristalino com baixa pressão, não há o desenvolvimento dessa segunda fase que o qualifica com o coeficiente de baixo atrito, semelhante ao do monocristal, e com isso reduzindo as perdas de energia por atrito entre a ferramenta de corte e o material, aumentando dessa forma, a eficiência do trabalho.

3.1.4. Outras propriedades

-Reatividade Química

Segundo WILKS; WILKS⁽⁵⁷⁾ experimentos realizados com o diamante submetido ao processo de desgaste do material de corte e abrasão, mostrou que a superfície da ferramenta diamantada fica quimicamente mais ativa quanto mais limpa estivesse. Esses experimentos levaram em consideração a pressão do ar e a velocidade de rotação da ferramenta, bem como a grafitação resultante no diamante. O autor ressalta, que a velocidade é determinante do desgaste por atividade química. Iniciando-se com a velocidade da ordem de 11 m/s no ar o desgaste é reduzido pela diminuição da velocidade ou a pressão do ar. Os diamantes cristalinos porosos tendem a se oxidar mais, por causa da maior superfície de contato do diamante com o oxigênio do ar.

-Estabilidade Térmica

A degradação do diamante com a temperatura é dependente da impureza do mesmo e da técnica de sinterização do policristalino (podendo ser a elevada ou baixa pressão). Diamantes industriais de boa qualidade com pequenas concentrações de impurezas têm estabilidade comparável a de um monocristalino em estado puro⁽⁵⁷⁾.

-Condutividade Térmica

Esta propriedade, também, é altamente influenciada pela pureza do cristal do diamante. A partir da natureza de sua estrutura de ligações carbono a carbono, fortemente coesa, traduzida em sua dureza, é que a transmissão do calor se propaga pela vibração térmica de seus átomos. O diamante de boa qualidade é portanto, um bom condutor térmico⁽⁵⁷⁾.

-Condutibilidade Elétrica

O diamante possui uma das mais altas resistividades dos materiais, alcançando o valor de 1×10^6 ohm-cm. A dopagem com o elemento boro, transformam o diamante em material semiconductor, que no futuro próximo poderá vir a substituir os semicondutores à base de silício ou arseneto de gálio na indústria⁽⁵⁷⁾.

3.2. Principais Usos do Diamante

A variedade de aplicações do diamante tem um notável impacto no progresso da economia mundial moderna a partir do seu emprego como ferramenta para perfuratrizes, máquinas de serragem e corte entre outros.

Segundo BIASTOCH; HERBERT (1983) apud WILKS; WILKS⁽⁵⁷⁾, o diamante é empregado no campo industrial, em ferramentas de torneamento na produção do cárter de motores a combustão interna, lentes de contato e no

acabamento final dos componentes óticos. É também utilizado como abrasivos em ferramentas de serragem/corte nas indústrias madeireiras e rochas ornamentais, nas perfuratrizes da indústria mineral e nas brocas dentárias utilizadas na medicina odontológica.

3.2.1. Joalheria e/ou adorno

O uso do diamante em joalheria é conhecido há séculos. A pedra só adquire a beleza de uma jóia depois de cortada em muitas facetas e posteriormente polida.

Segundo VEFFERIES (1752) apud WILKS; WILKS⁽⁵⁷⁾ o tipo de corte mais comum é aquele com 54 facetas no diamante, em que o detalhe de análise de sua ótica foi entendida por TOLKWSKY (1919) citado por WILKS e WILKS⁽⁵⁷⁾.

Segundo WILKS; WILKS⁽⁵⁷⁾ pela excelência de suas propriedades óticas como: reflexão, refração, dureza, etc. o diamante supera em beleza outras gemas concorrentes como o zircônio cúbico e o titanato de estrôncio.

3.2.2. Ferramenta diamantada

Os principais usos das ferramentas diamantadas na indústria mineral é encontrado em diversos segmentos desse setor, a saber:

- a) na pesquisa mineral, através das perfuratrizes com coroas

diamantadas, para prospecção de petróleo, minérios e rochas;

b) na atividade de exploração por meio das perfuratrizes de diversos tipos, em perfuração de furos com a finalidade de inserir a carga explosiva que deverá desmontar a rocha e os minérios bem como nas tecnologias de perfuração contínua;

c) na extração de mármore e granitos que empregam o cortador à corrente e fio diamantado;

d) no beneficiamento das rochas ornamentais nas etapas de desdobramento em ferramentas de lâminas diamantadas (serragem de mármore) e discos diamantados de cortes transversal e longitudinal.

-Revestimento

Os discos abrasivos possuem uma simetria perfeita em relação ao eixo do motor. Estes são revestidos com lascas de diamantes presos por materiais ligantes, também empregados em lâminas de serras abrasivas. Este assunto foi estudado por METZGER (1986) HOLZ ; SAUTEN (1988) citados por WILKS; WILKS⁽⁵⁷⁾, onde maiores detalhes poderão ser encontrados nos trabalhos publicados pelos mesmos.

-Elemento Abrasivo

Os elementos abrasivos tradicionais tais como: o quartzo, alumina, corindon, carbeto de silício, carbeto de boro, carbeto de tungstênio, nitreto de boro e a granalha de ferro ou metálica são empregados no trabalho abrasivo dos materiais dependendo do tipo de material ou tarefa a realizar, como no caso do carbeto e do nitreto de boro, mais duro que o carborundum que é empregado na usinagem de ligas ferrosas duras. A ferramenta diamantada, com base na sua notável dureza bem como na ótima condutividade térmica do diamante, tem sido cada vez mais utilizada no corte do granito e do mármore, como elemento abrasivo do fio diamantado. A indústria de rochas ornamentais utilizou ,em 1986, cerca de 10t de diamantes, correspondendo a 26% do total da produção mundial de diamante industrial (natural e sintético).

3.3. Tecnologia do Fio Diamantado

O fio diamantado é constituído por um cabo de aço que funciona como suporte para as pérolas diamantadas, separadas ao longo do cabo por molas metálicas, no caso dos mármore, ou então por material plástico ou borracha para o caso dos granitos⁽¹³⁾.

O elemento cortante (a pérola), é constituída de uma pasta diamantada montada sobre um suporte cilíndrico formando, assim, o anel de pérolas. O diâmetro externo do anel de pérolas varia durante a operação do corte, decrescendo de 11 a 8,5 mm, de acordo com a progressão do desgaste. O diâmetro interno do anel de pérolas é de 5 mm e seu comprimento atinge 10 mm. A pasta diamantada é constituída de um ligante ou matriz metálica que

engloba na sua composição partículas pontiagudas de diamante sintético⁽¹³⁾.

A deposição dos diamantes sobre o suporte ocorre por meio de dois processos distintos que consistem na fabricação dos elementos abrasivos do fio diamantado: eletrodeposição e sinterização. O processo por eletrodeposição é feito através de banhos galvânicos, que utiliza como eletrólitos um composto de sais de níquel. O processo por sinterização consiste na homogeneização/solidificação do metal com o diamante sintético a elevadas condições de pressão e temperatura⁽¹³⁾.

Segundo os autores^(12 e 13), anéis de pérolas sinterizadas é preferencialmente utilizados em rochas duras e abrasivas tipo granitos, pelo fato de permitir uma distribuição homogênea dos diamantes na constituição da pasta que, ao desgastar-se, promove o aparecimento de novos diamantes até o completo desgaste da pérola. Os anéis de pérolas eletrodepositadas é recomendável para rochas macias tipo mármore, onde grãos de diamantes ficam mais expostos nos anéis e, por conseguinte, facilita a ação do corte no material de modo mais eficaz, embora com maior desgaste.

Dessa forma a composição do ligante ou matriz metálica e a concentração dos grãos de diamante são determinadas em função da aplicação, isto é, do tipo de rocha a ser cortada, assim como se procede na produção de segmentos dos discos ou lâminas diamantadas^(12 e 13).

As pérolas diamantadas são colocadas ao longo do cabo de aço e

devem ser dispostas de modo a ter uma freqüência de 30-33 pérolas diamantadas por metro, para o caso de rochas macias, e de 30-42 pérolas por metro, para as rochas duras e abrasivas⁽¹³⁾.

Os autores^(12 e 13) recomendam que para manter o espaçamento entre as pérolas, deve-se utilizar distanciadores tubulares de diferentes tipos de materiais, de acordo com a finalidade do fio, seja para o corte de rochas carbonatadas ou silicatadas. Estes distanciadores podem ser de borracha, latão, aço ou plástico e possuem comprimentos correspondentes à distância entre duas pérolas contíguas e diâmetro inferior a estas. Os distanciadores mais difundidos são os de mola metálica, cuja característica é permitir a absorção de choques do fio contra rocha. Os distanciadores de plástico são produzidos com resina termoplástica, capaz de proteger o cabo de aço contra o desgaste. Pelo fato de a substância plástica ser injetada sob pressão, esta se insere inclusive sob a pérola, protegendo o cabo de aço da água e da polpa abrasiva. Os distanciadores por molas são utilizados de maneira universal para o corte das rochas carbonatadas (mármores), enquanto os de plástico são usados para as rochas silicatadas (granitos).

3.4. Avaliação do Elemento Abrasivo

BORTOLUSSI *et al.*^(34 e 58) atentam para o fato de que a tecnologia de corte com fio diamantado ainda não é amplamente empregada na exploração do granito, sendo ainda mais dispendiosa do que os métodos tradicionais baseados em perfuração. O uso de ferramenta é o item de custo mais elevado,

enquanto as despesas com investimento são relativamente moderadas. Os autores confirmam os problemas e dificuldades de obtenção de dados de produtividade da nova técnica relacionadas as condições operacionais na indústria. Dessa forma, levando em consideração a experiência de campo e medidas de laboratório, são obtidos os parâmetros necessários a realização dos cortes. Os autores estudaram o desempenho do corte com fio diamantado em diferentes rochas silicatadas (granito), através de um equipamento de laboratório, fabricado para realizar os experimentos.

Os autores ^(28 e 33) chamam atenção para a necessidade da realização de testes visando conhecer o comportamento do fio diamantado, e de particular modo no que se refere a sua durabilidade em relação as condições de emprego no corte dos granitos e outras rochas duras e abrasivas. Sabe-se que a avaliação do consumo do elemento diamantado no decorrer do corte na pedreira constitui-se em uma tarefa de difícil realização devido à dificuldade de subordinar o desenvolvimento das operações industriais às exigências experimentais. No entanto, a experimentação em laboratório permite superar as dificuldades que se apresentam na realização de medições nas pedreiras, além de possibilitar a realização de testes com anéis diamantados de vários tipos sobre rochas de diferentes características.

BORTOLUSSI *et al.*⁽³⁴⁾ descrevem os estudos de aplicabilidade econômica da tecnologia de corte com fio diamantado para os granitos da Sardenha e alertam na escolha do material para a sua competitividade de custo operacional visando o emprego integral na lavra, particularmente na

melhoria dos utensílios diamantados e revestimento protetor do fio. Os autores estudaram os desgastes dos elementos diamantados através de laboratórios em alguns granitos da Sardenha. Para isto foi fabricado um equipamento protótipo para efetuar a pesquisa visando a determinação do desgaste das pérolas diamantadas. A Figura 3.2. mostra uma ilustração esquemática da máquina I de ensaio de desgaste da pérola do fio diamantado.

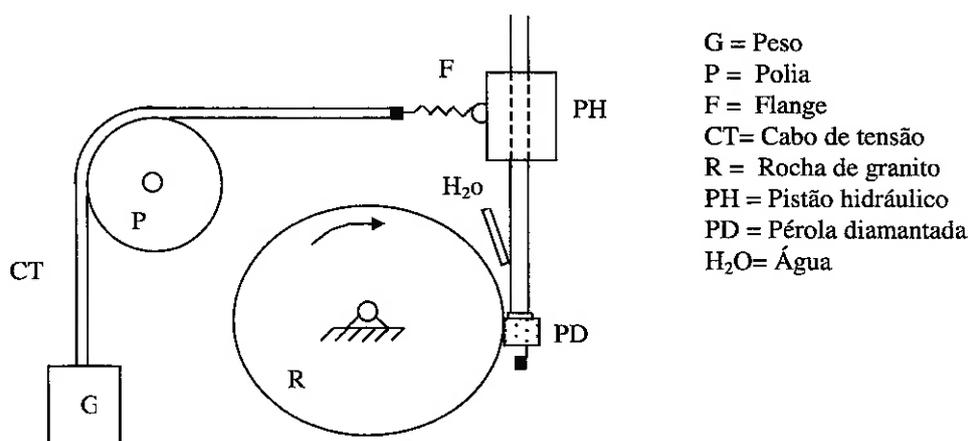


FIGURA 3.2 - ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DA MÁQUINA I DE ENSAIO

Fonte: BORTOLUSSI *et al.*⁽³⁴⁾

CARANASSIOS⁽¹²⁾ também estudou através de ensaios em laboratório alguns tipos de granitos produzidos em pedreiras da Sardenha, Itália, com o mesmo objetivo anterior, porém com uma outra máquina modificada, onde foi introduzido um mecanismo de contra-peso eliminando o sistema de pistão hidráulico. A Figura 3.3. mostra uma ilustração esquemática da máquina II de ensaio de desgaste do fio diamantado.

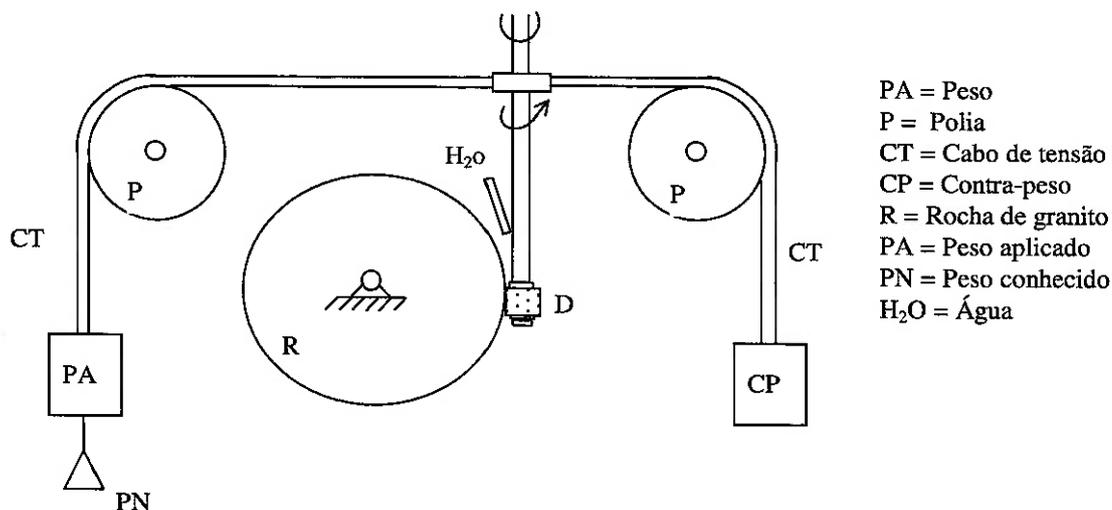


FIGURA 3.3 - ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DA MÁQUINA II DE ENSAIO

Fonte: CARANASSIOS⁽¹²⁾

Os autores ^(12 e 34) descrevem os dois equipamentos protótipos com seus respectivos aparatos necessários para um perfeito funcionamento: o disco de rocha é inserido em um eixo coligado a um motor elétrico, com velocidade de rotação regulável eletronicamente para um valor constante de velocidade relativa entre a pérola e a rocha, dentro de um campo de trabalho do fio diamantado (de 20 a 40 m/s). Uma pérola diamantada é colocada em contato contra a superfície periférica do disco de rocha. A pérola pode girar lentamente ao redor do seu próprio eixo de modo a consumir uniformemente.

AGUS *et al.*⁽⁴⁹⁾ discutem a evolução progressiva da pesquisa no desenvolvimento do corte com diamante em rochas duras. Os autores complementam dizendo da necessidade da realização dos ensaios

experimentais em laboratório para determinar a influência do material abrasivo na rocha e as variáveis operacionais de corte.

BORTOLUSSI *et al.*^(59 e 60) descrevem o estudo da avaliação das variáveis envolvidas na tecnologia de corte de rochas carbonatadas e silicatadas onde foi idealizado um programa de computador levando em consideração o desempenho da máquina de corte e o custo unitário que depende de um número de variáveis operacionais (velocidade periférica, força de retorno, velocidade de injeção d'água, ângulos das seções do fio fora da rocha bem como as características geométricas do próprio corte).

Segundo os autores^(50 e 60) esse estudo é altamente compensado tendo em vista a obtenção de blocos bem formados pelo corte além da elevada taxa de recuperação na lavra das pedreiras. Além disso, a velocidade de corte e produtividade do fio são influenciados pelo número e tipo das partições de corte do fio diamantado por unidade de comprimento destes, bem como pela natureza da rocha. Foram também descrito o mecanismo do modelo de corte enfocando as suas principais características. Foram feitas simulações virtuais sob várias condições e discutidos os resultados das mesmas visando a obtenção de um programa de computador confiável. O referido programa é muito útil como ferramenta para direcionamento de pesquisas e testes futuros.

BORTOLUSSI *et al.*^(61 e 62) desenvolveram vários modelos de simulação e otimização do corte de rochas ornamentais utilizando a tecnologia de fio diamantado, onde descrevem o mecanismo de corte com fio a partir de dados obtidos nas pedreiras em operação de lavra, visando a reprodução do

processo em laboratório. Os resultados do trabalho revelaram a eficiência do programa de simulação testado, com possibilidades, ainda, de ser utilizado em escala industrial.

AGUS *et al.* ⁽⁶³⁾ apresentam os resultados obtidos numa pesquisa experimental de ação do fio diamantado sobre as rochas silicáticas (granitos e similares). Os ensaios são realizados em laboratório, através do anel de pérolas do fio diamantado e, avaliados por meio de análise em estéreo microscópio, onde verifica-se o estado de desgaste das pérolas utilizadas nesses ensaios, sendo a seguir realizados estudos estatísticos com o resultado da pesquisa.

CARANASSIOS ⁽¹²⁾ estudou através de ensaios em laboratório alguns tipos de granitos produzidos em pedreiras da Sardenha, Itália, tendo como principal objetivo da pesquisa a avaliação do consumo do elemento abrasivo (pérolas diamantadas) fabricadas pelas indústrias de fio diamantado. Para isto, foi fabricada outra máquina para os ensaios em escala de laboratório com a finalidade de efetuar a pesquisa para determinação do desgaste das pérolas diamantadas.

CICCU *at al.* ⁽⁶⁴⁾ aperfeiçoaram as máquinas desenvolvidas, no período de 1989 a 1993, para os ensaios em escala de laboratório, estudando o granito Rosa Beta da região da Sardenha, Itália. Esta nova máquina com concepção mais inovadora no controle das variáveis operacionais com o objetivo de efetuar medições em rochas representativas de pedreiras, possui como corpo-

de-prova amostra em forma de um disco que permite submeter a pérola diamantada a diferentes solicitações, simulando as condições operacionais de uma máquina industrial.

3.5. Propriedades das Rochas Ornamentais

A caracterização tecnológica das rochas para fins ornamentais pode ser determinada através da execução de ensaios onde são conhecidas as peculiaridades dessas rochas. A característica principal para definição de uma rocha ornamental está relacionada com tenacidade, resistência mecânica, grau de polimento, além da forma e dimensão dos blocos extraídos. Dessa forma, todo material para ser empregado no setor da construção como rocha ornamental deve possuir certas características técnicas que permitam sua aplicação. Tais características são índices determinados em laboratórios, através de ensaios específicos que quando executados orientam o uso principal da rocha. As propriedades mecânicas são imprescindíveis para o emprego da rocha em geral, incluindo as que influenciam na lavra e no beneficiamento bem como na utilização do produto acabado. Assim, a necessidade de se dispor de uma caracterização físico-mecânica apurada das rochas ornamentais é uma condição muito importante, que embora tenha surgido no passado, na Itália, desponta hoje como fator preponderante para atender as exigências técnicas ligadas às grandes obras realizadas no principal mercado consumidor de produtos acabados tais como: Japão, Estados Unidos, Alemanha, entre outros.

Tendo em vista minimizar os problemas decorrentes da falta de conhecimento do comportamento das rochas utilizadas para fins ornamentais face as ações físico-químicas e mecânicas diante das solicitações consequentes, ensaios de caracterização tecnológica vêm sendo executados pelos diversos países envolvidos na produção e comercialização desses materiais, através de procedimentos padronizados por órgãos normatizadores, destacando-se entre os quais: American Society for Testing and Material - ASTM, Deutsches Institut für Normung - DIN, Association Française du Normalisation - AFNOR, Ente Nazionale Italiano de Unificazione - UNI, Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT e Asociación Española de Normalización y Certificación - AENOR, conforme tabela 3.1.

Os principais ensaios adotados no Brasil que qualificam as rochas ornamentais para o mercado interno e externo são os seguintes: ⁽⁶⁵⁾

Petrografia ⁽⁶⁶⁾: (NBR 12768) - Através desta análise é possível identificar sua natureza, composição mineralógica, arranjo textural, estado de alteração e microfissural de seus minerais constituintes das rochas, além de identificar aqueles friáveis, alterados, alteráveis e solúveis que possam comprometer a durabilidade ou o desempenho desses materiais.

Índices Físicos ⁽⁶⁷⁾: (NBR 12766) - Este ensaio constitui as propriedades referentes à massa específica aparente seca e saturada, porosidade aparente e absorção d'água. Os resultados decorrentes são indicativos das condições físico-mecânicas gerais das rochas.

**TABELA 3.1 - NORMAS TÉCNICAS PARA CARACTERIZAÇÃO
DE ROCHAS ORNAMENTAIS**

ENSAIO	ASTM	DIN	AFNOR	UNI	NBR	UNE
Petrografia	C- 295	n.d.	B- 0301	9724/1	12768	n.d.
Índices físicos	C- 97	52102 52103	B- 10503 B- 10504	9724/2	12766	22.182
Resistência à flexão	C- 99 C- 880	52112	B- 10510	9724/5	12763	22.186
Impacto de corpo duro	C- 170	n.d.	n.d.	n.d.	12764	22.189
Resistência à compressão	D- 2938 C- 170	52105	B- 10509	9724/4	12767	22.185
Dilatação térmica linear	E- 228	n.d.	n.d.	n.d.	12765	n.d.
Congelamento e degelo	n.d.	52104	B- 10513	n.d.	12769	n.d.
Desgaste Amsler	C- 241	52108	B- 10518	2232	12642	23.183
Módulo de deformabilidade estática	D- 3148	n.d.	n.d.	2234	n.d.	n.d.
Micro dureza Knoop	n.d.	n.d.	n.d.	9724/6	n.d.	22.188

Fonte: Vidal *et al.* ⁽⁶⁵⁾

Legenda : ASTM - americana, DIN - alemã, AFNOR - francesa, UNI - Italiana, NBR - brasileira, UNE - espanhola. n.d. - não disponível.

Resistência à Flexão⁽⁶⁸⁾ : (módulo de ruptura - NBR 12763) - Este ensaio visa determinar a resistência de um corpo rochoso quando submetido a ações conjuntas de compressão e tração. A determinação da resistência à flexão pode ser realizada de duas formas:

1. O carregamento se dá em três pontos. Os resultados obtidos a partir deste ensaio são mais indicativos das características gerais da rocha do que seus produtos.
2. O outro é efetuado com aplicação do esforço em quatro pontos. Por

adotar espessura mais próxima daquela utilizada em placas, este ensaio representa melhor as características do produto.

Impacto de Corpo Duro⁽⁶⁹⁾ : (NBR 12764) - Com este ensaio é possível se obter informações a respeito do grau de tenacidade de um material rochoso e conseqüentemente sua maior ou menor capacidade de suportar uma ação mecânica instantânea.

Resistência à Compressão⁽⁷⁰⁾ : (NBR 12767) - Este ensaio mede a tensão que provoca a ruptura da rocha e constitui um índice valioso da qualidade das pedras de revestimento. Elevados valores de resistência à compressão implicam de um modo geral em baixos valores de porosidade e alta resistência à flexão. Quanto mais alterada e microfraturada for a rocha analisada, menor será o valor correspondente a este ensaio.

Dilatação Térmica Linear⁽⁷¹⁾ : (NBR 12765) - Este ensaio é muito importante para materiais utilizados como revestimento exterior e interior.. Caso a junta de dilatação for subdimensionada, poderá haver deslocamento ou deformação das placas. A dilatação/contração, além de influenciar no comportamento das mesmas, é útil no processo de flamagem, quando se obtém acabamentos com superfícies ásperas.

Congelamento e Degelo⁽⁷²⁾ : (NBR 12769) - Este ensaio tem sua influência maior nos países onde as diferenças de temperatura são elevadas. No Brasil, como este fenômeno é raro e restrito a algumas

regiões, a simulação do mesmo visa uma caracterização tecnológica completa dos materiais rochosos, especialmente daqueles destinados à exportação.

Desgaste Amsler⁽⁷³⁾ : (NBR 12642) - Este ensaio mede a resistência que uma rocha oferece ao desgaste e está intimamente relacionada à dureza dos seus constituintes minerais e de sua compacticidade.

Módulo de Deformabilidade Estática⁽⁷⁴⁾ : (NBR 10341) - Este ensaio mede a capacidade de uma rocha se deformar sob a ação de esforços compressivos e estáticos, voltando a recuperar seu estado original quando o carregamento deixa de atuar. Solicitações dessa natureza não são comuns em rochas utilizadas como revestimento, ocorrendo apenas nos casos em que esses materiais assumem funções estruturais, como colunas e/ou pilares.

Microdureza Knoop : (Norma não disponível) - Este ensaio mede a penetração Knoop e é adequado para materiais frágeis e de dureza elevada como as placas de rochas, em função de sua ótima legibilidade. Os valores obtidos são expressos em MPa (a conversão de kg/mm^2 para Mpa se faz multiplicando os valores obtidos por 0,09807).

Alteração e Alterabilidade :(***Ensaio não normalizados***) -Este é talvez o ensaio mais importante para a qualificação da rocha na sua utilização como o material para revestimento em geral. Algumas rochas quando aplicadas

como revestimento externos, podem sofrer alterações de cor, apresentar manchas, deslocamento e/ou materiais pulveréos em sua superfície.

De acordo com AIRES-BARROS⁽⁷⁵⁾ a alteração de uma rocha é a sua desagregação e decomposição, da qual ocorre um conjunto de fenômenos físicos e químicos naturais, que leva a uma dada rocha a deixar de possuir o sistema químico em equilíbrio com as condições de formação, para se transformar em outro sistema físico-químico em equilíbrio com o meio ambiente nas condições de uma possível exploração mineral. A alterabilidade de uma rocha é sua alteração medida em função de um tempo humano, ou seja, é um índice de degradação durante a vida atribuível a uma obra de construção. Através do estudo da alteração/alterabilidade das rochas procura-se, portanto, compreender os fenômenos físicos, químicos, biológicos e mineralógicos que condicionam a degradação desses materiais na presença de ambientes específicos e se possível avaliá-los. O autor, em sua obra, inicialmente, desenvolveu uma análise do comportamento dos vários tipos de rochas devido ao seu intemperismo nas suas manifestações climáticas e no final fez um estudo das alterações e alterabilidade das rochas em uso nos monumentos.

Para que se possa avaliar de forma mais adequada as placas de revestimento é importante que se disponha de valores limites para suas propriedades. Esses valores devem ser especificados por órgãos normalizadores ou emitidos através da experiência de órgãos técnicos projetistas.

A American Society for Testing and Materials - ASTM ⁽⁷⁶⁾ , estabelece por meio das normas C615 valores limites com relação a alguns desses parâmetros para granitos, de acordo com a tabela 3.2.

FRAZÃO; FARJALLAT⁽⁷⁷⁾ realizaram um estudo sobre as características tecnológicas das principais rochas silicáticas usadas como revestimento no Brasil, onde sugeriram valores limites para todas as propriedades citadas anteriormente, com exceção da microdureza Knoop, tabela 3.2.

No trabalho realizado por VIDAL *et al.*⁽⁶⁵⁾ foram estudadas as propriedades tecnológicas dos granitos do Estado do Ceará, tais como: absorção d'água, massa específica e porosidade aparente, resistência à compressão uniaxial e à flexão (módulo de ruptura), resistência ao impacto de corpo duro e desgaste Amsler, cujos resultados obtidos foram comparados com os valores limites estabelecidos pela norma ASTM C 615⁽⁷⁶⁾ e aqueles propostos por FRAZÃO ; FARJALLAT⁽⁷⁷⁾

**TABELA 3.2 - VALORES ESPECIFICADOS PELA NORMA ASTM E
SUGERIDOS NO BRASIL**

PROPRIEDADES	VALORES FIXADOS PELA ASTM	VALORES SUGERIDOS POR FRAZÃO & FARJALLAT
Massa específica aparente (kg/cm ³)	• 2.560,00	• 2.550,0
Porosidade aparente (%)	n.e.	• 1,0
Absorção d'água (%)	• 0,40	• 0,4
Velocidade de propagação de ondas (m/s)	n.e.	• 4.000
Dilatação térmica linear (10 ⁻³ /mm.°C)	n.e.	• 12,0
Desgaste amsler (mm)	n.e.	• 1,0
Compressão uniaxial (MPa)	• 131,00	• 100,0
Flexão (módulo de ruptura) (MPa)	• 10,34	• 10,0
Módulo de deformabilidade estático (GPa)	n.e.	• 30,0
Impacto de corpo duro (m)	n.e.	• 0,4

Fonte : American Society for Testing and Materials - ASTM⁽⁷⁶⁾.

Frazão ; Farjallat⁽⁷⁷⁾

Legenda: n.e. = não especificado

A Comunidade Econômica Européia sentiu a necessidade da unificação de normas para as rochas ornamentais com o objetivo de facilitar a comercialização de tais produtos. Neste sentido foi criado o Comitê Europeu de Normalização - CEN, que preparou e submeteu à apreciação do Conselho Técnico um programa de normas técnicas no domínio da construção civil, que irá brevemente ser divulgado. Tão logo esse documento seja aprovado, os resultados serão apreciados por outros continentes que através de uma avaliação comparativa com novas normas adotadas em outros países deverá

chegar a um consenso geral e, posteriormente, elaborar um documento final de aceitação internacional. Os resultados de ensaios regidos por essas normas visam fornecer elementos que permitam a condução de especificações menos empíricas e, conseqüentemente, mais eficazes, seguras e econômicas, evitando insatisfações por parte dos consumidores, bem como a repercussão negativa das empresas projetistas e fornecedora desses materiais.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado com objetivo de avaliar a qualidade dos elementos abrasivos, anéis de pérolas diamantadas que constituem os fios diamantados de alguns fabricantes, nos diferentes tipos de granitos do Ceará. O estudo experimental foi realizado utilizando uma máquina protótipo pertencente ao laboratório do Departamento de Engenharia e Tecnologia Ambiental - DIGITA na Universidade de Cagliari, Itália e compreendeu as seguintes etapas:

- Visita técnica as pedreiras de granitos;
- Coleta e preparação das amostras nas pedreiras;
- Caracterização tecnológica das amostras de granitos;
- Realização dos ensaios de laboratório utilizando os anéis de pérolas diamantadas (elemento abrasivo) provenientes do fio diamantado;
- Cálculo das variáveis operacionais, balanços de massa dos ensaios e outros parâmetros tais como velocidade de corte e consumo das pérolas;
- Análise de anéis de pérolas de fios diamantados.

A seguir serão descritos os materiais e a metodologia utilizada para a escolha dos granitos, preparação, caracterização das amostras, realização dos ensaios de desgastes e análise dos dados.

Dando continuidade a programação da pesquisa foram visitadas várias pedreiras de granito em atividades de produção, das quais foram selecionadas 4(quatro) diferentes tipos de granitos do Ceará, a saber: Asa Branca, Rosa Iracema, Red Symphony e Casa Blanca. A seguir estão descritas as pedreiras de granito escolhidas para o estudo de laboratório.

4.1. Jazidas Estudadas

4.1.1. Pedreira Granito Asa Branca

Direito Mineral: Portaria de lavra

Local/Município: Fazenda Memória/Santa Quitéria

Produto: Designação Comercial : Asa Branca, Branco Cristal
e Branco Ceará

Reserva Medida: 98.226.000 m³ (maciço)

Acesso: Partindo-se de Fortaleza, o acesso pode ser feito através da BR 020 (revestimento asfáltico), onde são percorridos 110 Km até a cidade de Canindé. Daí, segue pela rodovia estadual CE 032 (asfaltada) cerca de 105 Km até a cidade de Santa Quitéria e, desta, mais 20 Km por estrada vicinal (revestimento solto), em direção oeste até a pedreira.

Geologia Local: A área é constituída por um albita-granito de idade Cambriana, ocorrendo sob a forma de "stock", ligeiramente arredondado, com eixo maior com cerca de 2,5 Km e o eixo menor de 2 Km, ocupando uma área de 5 Km². Trata-se de uma rocha ígnea-plutônica de natureza metassomática e

de origem magmática tardia, exibindo intensos processos de metassomatismo, caracterizado principalmente pela albitização dos K-feldspato e sericitização do mesmo como também pela substituição da biotita por mica branca (zinwaldita).

Atividade Extrativa: A exploração da jazida teve início em 1990. A lavra é feita através de bancada em maciço rochoso, com dimensão média de 30 m de comprimentos por 5 m de altura e largura de 6 m. A abertura dos canais laterais para o isolamento das “pastilhas” tem sido realizada por “flame-jet”. A liberação das bancadas é completada por furação vertical realizada por “Quarry-Bar” e perfuratrizes tipo AC RH 571/658. Nota-se claramente a ausência de acompanhamento técnico especializado, ocasionando um percentual considerável de material desperdiçado. O desmonte é feito com uso de cordel detonante NP-10. O desenvolvimento da lavra forma cava em depressão, em virtude do pequeno destaque topográfico da jazida. A produção mensal é cerca de 1.000 m³/mês, decrescendo um pouco na quadra invernos (março a junho). Tamanho dos blocos 2,90 m x 1,60 m x 1,60 m (mercado externo) e 2,90 m x 2,10 m x 1,60 m (mercado interno).

4.1.2. Pedreira Granito Rosa Iracema

Direito Mineral: Relatório de pesquisa aprovado

Local/Município: Serra da Barriga/Forquilha

Produto: Designação Comercial: Rosa Iracema

Reserva Medida: 5.048.551 m³ (maciço)

Acesso: Partindo-se de Fortaleza pode ser feito percorrendo-se 203

Km na BR-222, onde toma-se uma carroçável à direita que vai para a Fazenda Agropecuária Oriente e percorre-se mais 17 Km até a pedreira.

Geologia local: O granito tem uma distribuição extensiva numa área de 613 ha, de relevo peneplanizado e na base da Serra da Barriga. Está inserido na borda do “stock” Serra da Barriga.

O “stock” Serra da Barriga corresponde a um dos mais perfeitos “stocks” circulares, com diâmetro entre 8,5 Km e 7,5 Km, perfeitamente delimitado por contatos bruscos e intrusivos, com gnaisses migmatizados. Na sua porção central o corpo destaca-se por constituir áreas serranas com altitudes que atingem 700 m, as quais contrastam fortemente com suas porções periféricas, com larguras entre 500 m e 1 Km, constituindo áreas arrasadas e relativamente planas. O corpo do maciço é representado por granitos leucocráticos, isotrópicos, de granulação grosseira e coloração róseo esbranquiçada.

O granito Rosa Iracema ocorre na área sob a forma de maciços, numa área de 613 ha. Foram cubados em torno de 50 maciços, com volumes variando de 672 m³ a 2.461 m³.

Atividade Extrativa: A exploração é feita através da IMARF-Mineração de Granitos Ltda, tendo seu início em abril de 1995. A lavra é feita através de bancada em maciço rochoso, com dimensão média de 20 m de comprimentos por 5 m de altura e largura de 6 m. A abertura dos canais

laterais para o isolamento das “pastilhas” tem sido realizada por “flame-jet”. A liberação das bancadas é completada por furação vertical realizada por “Quarry-Bar” e perfuratrizes tipo AC RH 571/658. Nota-se claramente a ausência de acompanhamento técnico especializado, ocasionando um percentual considerável de material desperdiçado. O desmonte é feito com uso de cordel detonante NP-10. O desenvolvimento da lavra forma cava em depressão, em virtude do pequeno destaque topográfico da jazida. A produção mensal é cerca de 500 m³/mês, decrescendo um pouco na quadra invernos (março a junho). Tamanho dos blocos para mercado externo: 2,90 m x 1,90 m x 1,60 m; tamanho dos blocos para mercado interno: 3,30 m x 1,90 m x 1,65 m e 2,90 m x 2,20 m x 1,60 m, que são transportados para as indústrias de beneficiamento das empresas pertencentes ao grupo (GRANOS e IMARF)

4.1.3. Pedreira Granito Red Symphony

Direito Mineral: Portaria de Lavra

Local/Município: Aracatiaçu/Sobral

Produto: Designação Comercial : Red Symphony e Yellow Symphony

Reserva Medida: 108.954 m³ (matacões)

18.745.395 m³ (maciço)

Tipo Petrográfico: Migmatito

Acesso: Partindo-se de Fortaleza, o acesso é feito através da BR-222(asfaltada), onde são percorridos cerca de 80 Km até a localidade de Patos. Daí, segue-se pela rodovia estadual CE-176 (asfaltada), percorrendo-se cerca de 13 Km até a entrada para a pedreira, a qual está localizada à margem

desta rodovia estadual.

Geologia Local: A área é constituída por um migmatito de granulação média a grossa, apresentando dois fácies distintos, um avermelhado (Red Symphony) e outro amarelado (Yellow Symphony). Morfologicamente, ocorrem sob a forma de matacões de tamanhos variados e maciços rochosos. Os migmatitos são do tipo heterogêneos dominantes, embrechitos, anatexitos, com faixas de gnaisses e quartzitos. O granito Red Symphony estende-se por toda a área e trata-se de uma rocha de tom rosa claro a forte dominante, com poções mais avermelhadas, granulação grosseira, textura uniforme e movimentado por microdobramento desarmônicos. É constituído essencialmente de K-feldspato (predominante), quartzo, micas e tendo como acessório principal a magnetita. O granito Yellow Symphony não é encontrado em todo corpo aflorante e apresenta coloração cinza-amarelada, proveniente da alteração do granito vermelho, representando a capa de alteração do maciço rochoso.

Atividade Extrativa: Atualmente a lavra é realizada somente em matacões e montarias de dimensões variando de 50 a 100 m³. Depois de selecionados os matacões inicia-se o trabalho de desaterro, de modo a deixar o corpo lateralmente livre, facilitando a extração. A terceira etapa começa com a marcação de uma determinada direção chamada de “*riff*”, correspondente à parte do matacão que se rompe com maior facilidade. Sobre “*riff*” elege-se um ponto central, onde é efetuado um furo de diâmetro variado de 3/4 polegadas - 7/8 polegadas, prolongando-se até uma profundidade que corresponde a 2/3

da altura do matacão. Após realizado o furo faz-se uma raição no interior do furo e para a ruptura do matacão utiliza-se o processo de fogacho. A seguir, o retalho final dos blocos de volumes em torno de 8 m³ é realizada com perfuratrizes manuais combinadas com perfuratrizes de coluna, tipo talha-blocos. O trabalho final de preparação dos blocos é realizado no canteiro da pedreira a fim de retocá-los, onde são removidas as saliências, dando-se aos blocos a forma e dimensões desejadas, estando, portanto elaborados para o deslocamento. A produção mensal é cerca de 250 m³/mês, decrescendo um pouco na quadra invernososa (março a junho). Tamanho dos blocos: 2,90 m x 1,60 m x 1,60 m (mercado externo) e 2,90 m x 2,40 m x 1,60 m (mercado interno).

4.1.4. Pedreira Granito Casa Blanca

Direito Mineral: Relatório de pesquisa aprovado

Local/Município: Tróia/Pedra Branca

Produto: Designação Comercial : Casa Blanca

Reserva Medida: 24.174.144 m³ (maciço)

Acesso: Partindo-se de Fortaleza, o acesso é feito pela BR 020 até a localidade de Riachão Banabuiú (Cruzeta), percorrendo-se 270 quilômetros. Daí, segue-se por uma vicinal para Pedra Branca, trafegando-se cerca de 12 Km até a entrada para Tróia. A pedreira situa-se a 0,5 Km da localidade de Tróia.

Geologia Local: A área é constituída, principalmente, por ortognaisses

leucocráticos, bastante micáceos e com muita granada, cortados por veios pegmatóides. Ocorrem sob a forma de maciço. Trata-se de um biotita-monzogranito exibindo processo de metassomatismo para um muscovita monzogranito. Observam-se ainda neste corpo um maciço aparentemente íntegro, porém com elevado nível de tensão residual.

Atividade Extrativa: Foi aberta uma frente de lavra, utilizando-se fio diamantado, a qual apresentou sérios problemas de microfraturas dificultando, por conseguinte, o aproveitamento do material. Produção mensal é bastante variável (entre 150 - 300 m³). Atualmente a produção encontra-se paralisada por motivos técnicos relacionados aos problemas de tensões de alívio.

4.2. Caracterização Tecnológica dos Granitos

A informação mais importante da análise minero-petrográfica consiste no conhecimento dos dados qualitativos e quantitativos dos minerais componentes da rocha, observando dessa forma o estado de alteração do material.

A caracterização petrográfica e mineralógica das amostras foi realizada com o objetivo de identificar os litotipos e quantificar os minerais presentes nos mesmos, além de observar suas alterações. Estes estudos foram realizados em microscópio ótico polarizante, do tipo LEITZ-LABORLUX 12", utilizando secções delgadas.

A caracterização tecnológica das amostras foi realizada através dos ensaios tecnológicos normalizados segundo as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas- ABNT onde pode-se avaliar, as características dos granitos estudados , através das propriedades físico-mecânicas.

4.3. Equipamento de Laboratório

A máquina para os ensaios em escala de laboratório foi construída em 1990 e adaptada por diversos pesquisadores do Departamento de Geoengenharia e Tecnologia Ambiental da Universidade de Cagliari, em 1996, com finalidade de efetuar medições em amostras de rochas, em forma de um disco com 30 cm de diâmetro por 4 cm de espessura que permite submeter o anel de pérolas diamantadas a diferentes solicitações periódicas.

As figuras 4.1 e 4.2, mostram o aparato necessário para o seu funcionamento, onde o disco de rocha é inserido em um eixo ligado por transmissão de correia e polia em V, a um motor elétrico. A velocidade de rotação do disco pode ser regulável através da polia motora para um valor constante de velocidade periférica em relação ao anel de pérolas diamantadas num intervalo de velocidade de 20 a 40 m/s. Um único anel de pérolas diamantadas é colocado em contato com a superfície periférica do disco de rocha. Esse anel de pérolas pode girar lentamente ao redor do seu próprio eixo de modo a ser desgastado uniformemente.

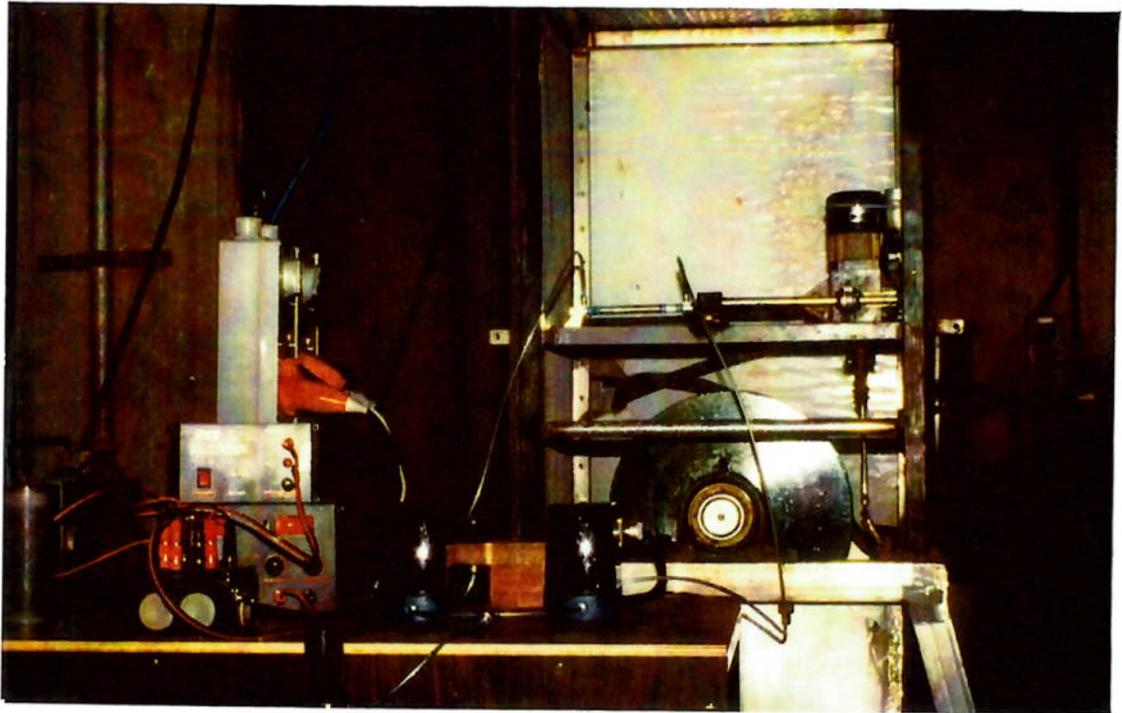


FIGURA 4.1- FOTOGRAFIA DA MÁQUINA III DE ENSAIO E SEUS COMPONENTES ELETROMECAÑICOS

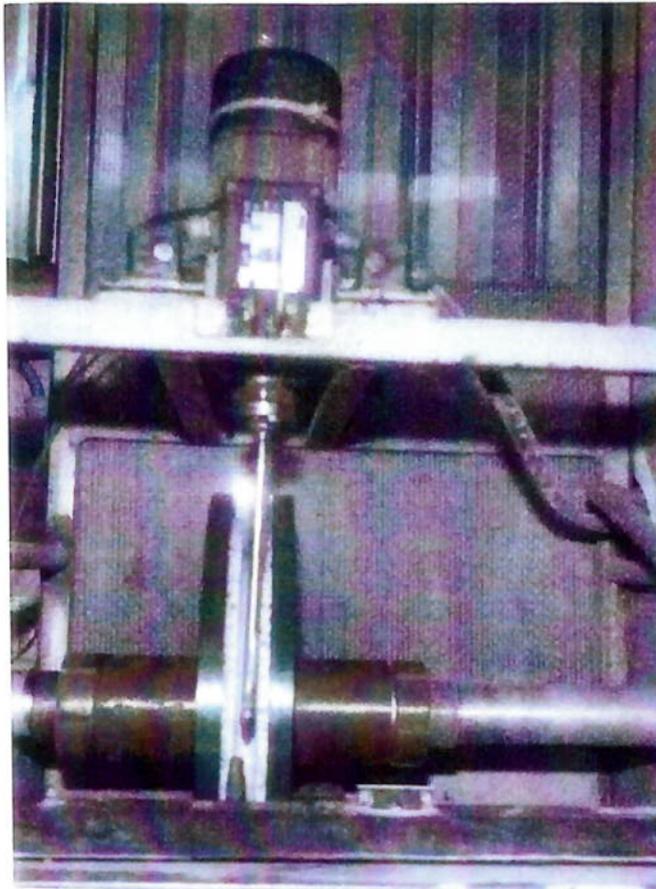


FIGURA 4.2 – FOTOGRAFIA DO DISCO DE ROCHA DE GRANITO E BASTÃO COM O ANEL DE PÉROLAS DIAMANTADAS

As tensões de contato entre o anel e a rocha são obtidas mediante a aplicação de um pistão pneumático de precisão com dupla ação (impulso controlado e constante) variando de 0,1 a 4Kg. O controle desta força de impulso é o resultado da pressão diferencial sobre o pistão, obtida através de duas válvulas de precisão comandadas eletricamente, as quais mantêm uma pressão constante independente do movimento do mesmo, pois utiliza a energia do ar comprimido nos dois sentidos de movimento (avanço e retorno). Para isto são necessárias as válvulas de controle de fluxo unidirecional que permitem a entrada e saída do fluxo de ar no cilindro. Variando a pressão na linha o ajuste da força do pistão pneumático é fixado com precisão. A figura 4.3 mostra uma ilustração esquemática da máquina III de ensaio de desgaste da pérola do fio diamantado. A figura 4.4 mostra em ângulos diferentes, ilustrações esquemáticas do sistema eletromecânico da máquina III de ensaio de desgaste no anel de pérolas do fio diamantado.

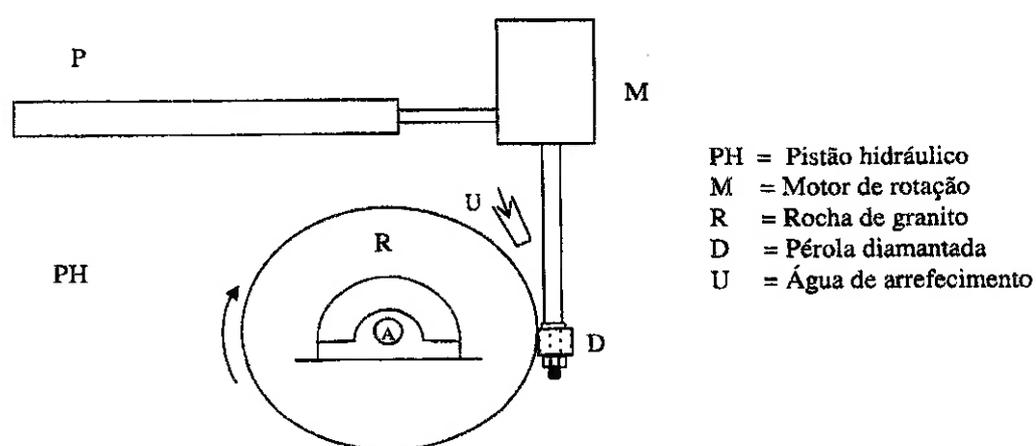


FIGURA 4.3 - ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DA MÁQUINA III DE ENSAIO

Fonte: CICCUC *et.al.*⁽⁶⁴⁾

4.4. Ensaio de Laboratório

Dando continuidade a programação do projeto foram realizados na Universidade de Cagliari, ensaios de laboratório com amostras representativas de 4 (quatro) diferentes tipos de granitos produzidos em pedreiras do Ceará (Asa Branca, Rosa Iracema, Red Symphony e Casa Blanca).

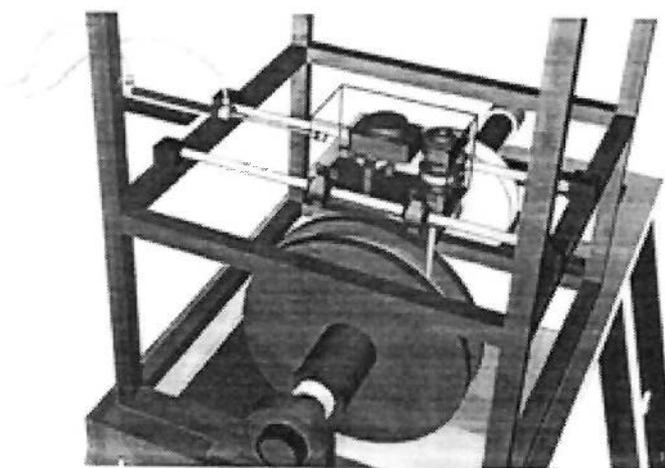
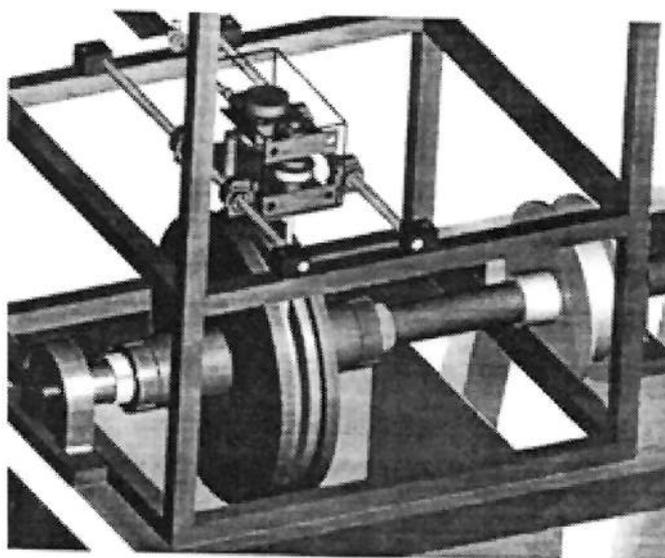


FIGURA 4.4 – ILUSTRAÇÃO DE DETALHES EM ÂNGULOS DIFERENTES DO SISTEMA ELETROMECAÂNICO DA MÁQUINA III DE ENSAIO

O objetivo principal desse estudo é avaliar em escala de laboratório o consumo dos elementos diamantados fabricados pelas indústrias de fio diamantado em rochas de diferentes características.

Para realização desses ensaios com o objetivo de indentificar o tipo de fio diamantado adequado para cada granito foi necessário apenas 1% do total utilizado na mina, geralmente, em torno de 40 m para fazer o corte de bancada na frente de lavra.

Sabe-se que esta avaliação no decorrer do corte de bancada na mina constitui-se em uma tarefa de difícil realização devido as dificuldades de subordinar o desenvolvimento das atividades de produção (operações industriais) às exigências experimentais. No entanto os ensaios em laboratório permitem superar essas dificuldades que se apresentam na efetivação de medições nas pedreiras e dessa forma é identificado o tipo de fio diamantado de melhor desempenho para um determinado granito sendo obtidos os parâmetros necessários à realização dos cortes.

Os ensaios experimentais com as amostras de granitos do Ceará de nome comercial Rosa Iracema, Asa Branca, Red Symphony e Casa Blanca foram realizados e concluídos na Universidade de Cagliari.

A seguir, nos laboratórios do NUTEC, foi efetuado um estudo de caracterização dos anéis de pérolas diamantadas em amostras de 8 (oito) fios diamantados, através de estereomicroscópio OLYMPUS SZ-BR, visando

quantificar o número de diamantes por anel. As amostras provenientes de dois fabricantes diferentes, possuem números de anéis com espaçadores variáveis.

Com o objetivo de identificar o tipo de pérola de melhor desempenho para um determinado granito, foram programados ensaios experimentais na Universidade de Cagliari, Itália, sob a orientação do Prof. Raimondo Ciccu em amostra representativas dos granitos do Ceará, de nomes comerciais Rosa Iracema, Asa Branca, Red Symphony e Casa Blanca. Com os referidos ensaios deverão ser obtidos também os parâmetros necessários para realização de corte na mina, em escala industrial.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A tabela 5.1. apresenta os resultados de análise química dos granitos estudados. Esses resultados mostram que os teores de SiO_2 e Al_2O_3 nas amostras dos granitos Asa Branca, Rosa Iracema e Casa Blanca são aproximadamente iguais, enquanto que os teores de Na_2O e K_2O são diferentes entre si.

TABELA 5.1 - ANÁLISE QUÍMICA DOS GRANITOS

COMPOSIÇÃO QUÍMICA	NOME COMERCIAL E TEOR (%)			
	ASA BRANCA	ROSA IRACEMA	RED SYMPHONY	CASA BLANCA
SiO_2	74,70	73,98	70,33	73,51
TiO_2	0,03	0,05	0,17	0,01
Al_2O_3	15,31	15,24	17,18	15,72
Fe_2O_3	0,85	0,71	0,71	0,47
FeO	-	-	-	-
MnO	0,04	0,01	0,04	0,03
MgO	0,10	0,05	0,43	0,03
CaO	0,65	0,62	1,41	0,33
Na_2O	4,18	3,47	4,14	5,47
K_2O	2,77	5,10	4,04	3,80
P_2O_5	0,02	0,01	0,07	0,01
Outros	1,35	0,77	1,48	0,62

Fonte: DIGITA - Universidade de Cagliari

A caracterização mineralógica das amostras foi realizada com objetivo de qualificar e quantificar os minerais. Na tabela 5.2 estão apresentados os resultados da composição mineralógica dos granitos analisados com seus respectivos tipos petrográficos.

TABELA 5.2 - ANÁLISE PETROGRÁFICA E MINERALÓGICA

NOME COMERCIAL	COMPOSIÇÃO DA ROCHA	APROX. %	TIPO PETROGRÁFICO DO GRANITO
Rosa Iracema	Feldspatos Quartzo Biotita Acessórios	65 29 04 01	Sienogranito
Asa Branca	Feldspatos Quartzo Micas Acessórios	60 25 12 03	Albita-Granito
Casa Blanca	Feldspatos Quartzo Moscovita Acessórios	69 23 05 03	Leuco-Gnaiss
Red Symphony	Feldspatos Quartzo Micas Acessórios	52 22 22 04	Monzogranito Tectonizado

Fonte: NUTEC-Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial

IPT- Instituto de Pesquisas Tecnológicas

Esses resultados mostram que a percentagem de quartzo na amostra do granito Rosa Iracema é superior as demais. Os resultados petrográficos mostram que todas as amostras estudadas são granitos de tipos litológicos diferentes.

O granito Rosa Iracema, macroscopicamente, apresenta estrutura maciça-homogênea/irregular, com concentrações de minerais félsicos (creme rosados) e máficos (negros) , granulação grosseira, com predominância de cristais em torno de 3 a 10 mm de comprimento, muito embora haja cristais de feldspato potássico (KF) com comprimento superior a 2 cm. Observam-se

manchas esbranquiçadas (caulinização dos feldspatos) e manchas amarelo-avermelhadas junto às biotitas (oxidação). Ao microscópio a rocha apresenta textura granular-hipidiomórfica, variando para granular-xenomórfica, constituída essencialmente de K-feldspato, plagioclásio, quartzo e biotita.

O granito Asa Branca, macroscopicamente, apresenta coloração branca leitosa com alguns pontos escuros dispersos, representados por agregados de biotitas. Apresenta granulação de média a grosseira, uma textura granular seriada, representada por cristais de quartzo subarredondados e com formas primáticas com bordos arredondados, dispersos numa matriz feldspática contendo mica branca, exibindo característica de aplito-granítico. Microscopicamente, a rocha exibe textura granular-hipidiomórfica, composta essencialmente por K-feldspato, plagioclásio, quartzo e micas. Apresenta cristais de quartzo desenvolvidos, denotando um crescimento magmático tardio.

O granito Casa Blanca, macroscopicamente, apresenta coloração branca com matizes acinzentados-hialinos e negros (minerais máficos distribuídos irregularmente), estrutura maciça-homogênea/irregular-seriada, granulação média grosseira, com predomínio de cristais em torno de 0,1 a 0,2 cm, embora alguns cristais alcancem tamanhos entre 1,0 e 2,0 cm. Apresenta as vezes, junto às muscovitas agregados micáceos biotíticos. Microscopicamente, a rocha apresenta textura granular-xenomórfica/seriada (inequigranular), localmente granular-hipidiomórfica/seriada, constituída essencialmente de K-feldspato, plagioclásio, quartzo e muscovita.

O granito Red Symphony macroscopicamente, apresenta coloração cinza rosada e avermelhada, representada por matizes e concentrações escuras patenteadas por minerais félsicos constituindo uma textura granular grosseira. Observam-se também pequenos bolsões de coloração rosada. O K-feldspato geralmente são rosados, enquanto os plagioclásios e quartzo são de coloração branca/hialinos e estão associados aos K-feldspato e mica. Localmente, observa-se certa orientação e processo de oxidação nas biotitas, com a presença de minerais de ferro (magnetita) parcialmente oxidados. Microscopicamente, a rocha foi definida como ígnea-plutônica, com textura granular-hipidiomórfica-grosseira variando, para textura granular-cataclástica-grosseira, composta essencialmente por K-feldspato, plagioclásio, quartzo e mica. Nas figuras 5.1. e 5.2. são apresentadas fotomicrografias dos granitos Rosa Iracema e Asa Branca, respectivamente.

Os ensaios de caracterização tecnológicas das amostras foram realizados de acordo com as normas brasileiras (NBR), com exceção às análises de dureza (Knoop e Mohs) que foram feitas de acordo com as normas italianas (UNI), tabela 3.1.



FIGURA 5.1 – FOTOMICROGRAFIA DO GRANITO ROSA IRACEMA

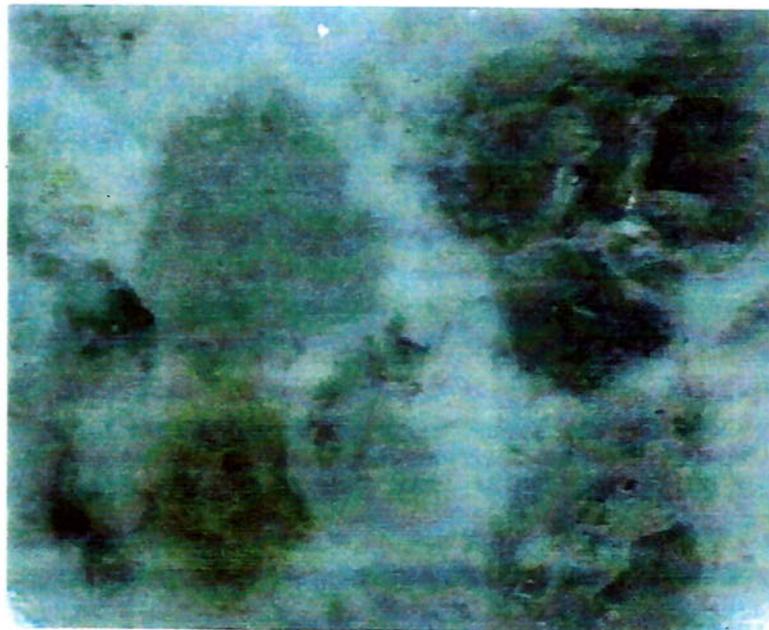


FIGURA 5.2 – FOTOMICROGRAFIA DO GRANITO ASA BRANCA

A tabela 5.3 apresenta os resultados da caracterização tecnológica dos granitos, através dos índices físicos e mecânicos obtidos das amostras estudadas.

TABELA 5.3 - CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS GRANITOS

NOME COMERCIAL	ME (g/cm)	PA (%)	AA (%)	CP (MPa)	FX (MPa)	IP (cm)	DA (mm)	DK (MPa)	DM (Hm)
Rosa Iracema	2,611	0,82	0,31	145,00	13,29	66,00	0,61	7.250	6,10
Asa Branca	2,607	1,19	0,46	107,00	16,70	60,00	0,65	6.920	5,69
Casa Blanca	2,496	0,36	0,15	85,40	11,90	67,50	0,87	5.940	5,91
RedSymphony	2,670	0,37	0,24	207,00	14,00	60,00	0,69	5.514	5,51

Fonte: NUTEC-Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial

DIGITA-Universidade de Cagliari
IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas

Legenda:

ME = Massa específica
PA = Porosidade aparente
AA = Absorção d'água
CP = Compressão
FX = Flexão
IP = Impacto
DA = Desgaste Amsler
DK = Dureza Knoop
DM = Dureza Mohs média

Esses resultados mostram que os índices físicos de porosidade (%) e absorção d'água do granito Asa Branca estão acima dos valores fixados pela norma AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAIS- ASTM e sugeridos por FRAZÃO & FARJALLAT, tabela 3.2 . O resultado do ensaio de resistência à compressão do granito Casa Blanca está bem abaixo do limite

minimo fixado pela norma, tabela 3.2. Isto pode ser atribuído ao sentido de corte realizado na lavra para obter o melhor desenho estético da chapa. Por se tratar de um material que possui extensa foliação de muscovita o corte das bancadas na lavra não poderá ser realizado no sentido perpendicular à direção de foliação das micas, pois diminui sensivelmente a resistencia do material.

A tabela 5.4 mostra os resultados de análise dos anéis de pérolas realizados em diferentes fios diamantados fabricados no mercado internacional. Esses resultados mostram, em alguns casos, a ausência de pontos de diamantes, e em outros, diferenças acentuadas no número de diamantes em anéis de pérola de um mesmo fio diamantado. Esses resultados indicam, em duas amostras de um mesmo fio diamantado, diferença entre um e outra de até 62 diamantes por anel.

Com o objetivo de identificar o tipo de pérolas de melhor rendimento para um determinado granito, foram programados ensaios experimentais no Departamento de Geoengenharia de Tecnologia Ambiental da Universidade de Cagliari, Itália, em amostras representativas dos granitos do Ceará, de nomes comerciais Rosa Iracema, Asa Branca, Red Symphony e Casa Blanca. A partir dos resultados obtidos como nos ensaios será possível obter a escolha do melhor fio diamantado para os granitos em questão bem como os parâmetros necessários para a realização de corte na pedra.

TABELA 5.4 -ANÁLISE DE ANÉIS DE PÉROLAS DE FIOS DIAMANTADOS

AMOSTRA Nº	Nº DE ANÉIS ANALISADOS	Nº DE DIAMANTES POR ANEL	OBSERVAÇÕES
1	9	197	
2	5	124,2	
3	10	71,1	
4	3	99,6	
5	2	-	estado do fio não possibilitou a análise
6	2	68	
7	2	81,5	
8	1	15	

Fonte: NUTEC- Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial

As tabelas 5.5, 5.6 e 5.7 apresentam os resultados dos ensaios do granito Asa Branca utilizando os elementos abrasivos marca “co-fi-plast” e “diamond board”.

Nas tabelas 5.8 e 5.9, em anexo, estão apresentados os resultados dos ensaios do granito Rosa Iracema utilizando os elementos abrasivos marca “diamond board” e “co-fi-plast”

As figuras 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7, em anexo, mostram os efeitos da velocidade de corte bem como o consumo das pérolas diamantadas de marca “co-fi-plast” e “diamond board”, com os granitos Asa Branca e Rosa Iracema.

TABELA 5.5 – ENSAIOS DO GRANITO ASA BRANCA 1 UTILIZANDO O ELEMENTO ABRASIVO MARCA “CO-FI-PLAST”

Carga (g)	262	523	719	981	1243	1504	1766
Corte(cm²/min)	4,4881	5,3405	6,0746	8,3375	8,121	9,0757	14,719
Consumo pérola(g/cm²)	0,028364	0,015308	0,045468	0,050038	0,018429	0,065871	0,035324

Fonte: DIGITA – Universidade de Cagliari

TABELA 5.6 – ENSAIOS DO GRANITO ASA BRANCA 2 UTILIZANDO O ELEMENTO ABRASIVO MARCA “DIAMOND BOARD”

Carga (g)	262	523	719	981	1243	1504	1766
Corte(cm²/min)	4,1163	5,9835	4,1769	4,094	2,0759	6,6572	12,0966
Consumo pérola(g/cm²)	0,042	0,0413	0,0883	0,1321	0,282	0,0783	0,0271

Fonte: DIGITA – Universidade de Cagliari

TABELA 5.7 – ENSAIOS DO GRANITO ASA BRANCA 3 UTILIZANDO O ELEMENTO ABRASIVO MARCA “CO-FI-PLAST”

Carga (g)	1750	2000	2250	1500	1250	1000	750
Corte(cm²/min)	4,693	7,8738	6,3775	4,1193	3,0409	3,7743	1,833
Consumo pérola(g/cm²)	0,0145	0,0318	0,0506	0,0159	0,0152	0,0083	0,0069

Fonte: DIGITA – Universidade de Cagliari

As figuras 5.8 e 5.9 mostram as comparações dos resultados obtidos com o granito Asa Branca utilizando as pérolas diamantadas de marca “co-fi-plast” e “diamond board”. Nestas figuras pode-se observar que o granito Asa Branca tem um melhor rendimento com o fio diamantado de fabricação “co-fi-plast”.

Ao analisar os dados de velocidade de corte e do consumo da pérola nos ensaios realizados com o granito Asa Branca, utilizando os dois tipos de pérolas (“co-fi-plast” e “diamond board”), figuras 5.8 e 5.9, verifica-se que a pérola do tipo “co-fi-plast” tem uma ação de corte eficiente, com menor consumo do que a “diamond board”, principalmente para cargas superiores a 1.000 g.

Na figura 5.6, em anexo, observa-se que os resultados dos ensaios obtidos com o granito Rosa Iracema utilizando as pérolas diamantadas “diamond board” não foram satisfatórios, apresentando baixo coeficiente de regressão linear na velocidade de corte. Portanto não foi possível realizar as comparações dos resultados com os dois elementos abrasivos de marcas diferentes, embora os resultados com as pérolas de “co-fi-plast” tenha sido melhor do que com a “diamond bord”

As tabelas 5.10 e 5.11, em anexo, apresentam os resultados dos ensaios dos granitos Red Symphony e Casa Blanca, respectivamente, utilizando os elementos abrasivos marca “co-fi-plast”. As figuras 5.10 e 5.11 mostram os efeitos da velocidade de corte e consumo das pérolas com os granitos Red Symphony e Casa Blanca.

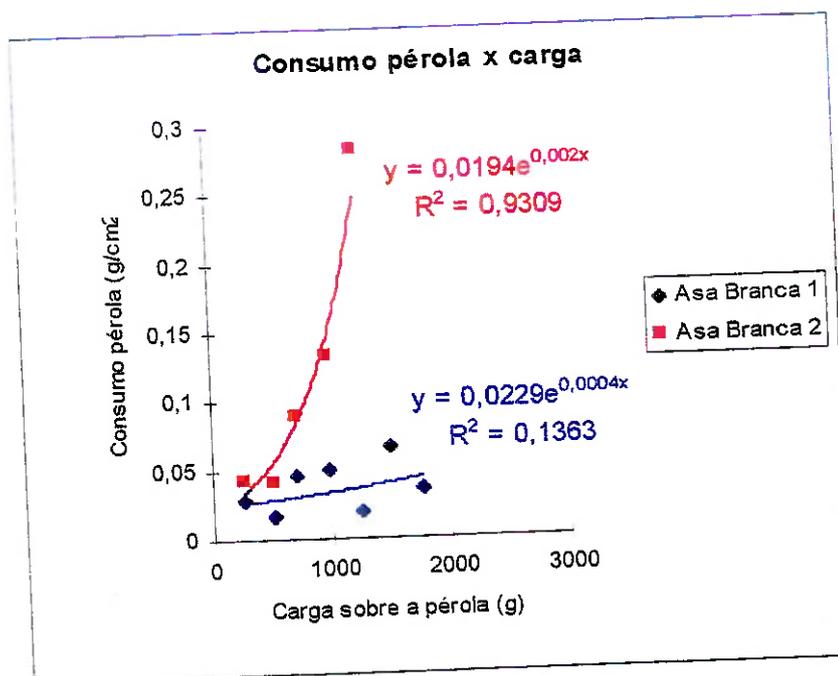
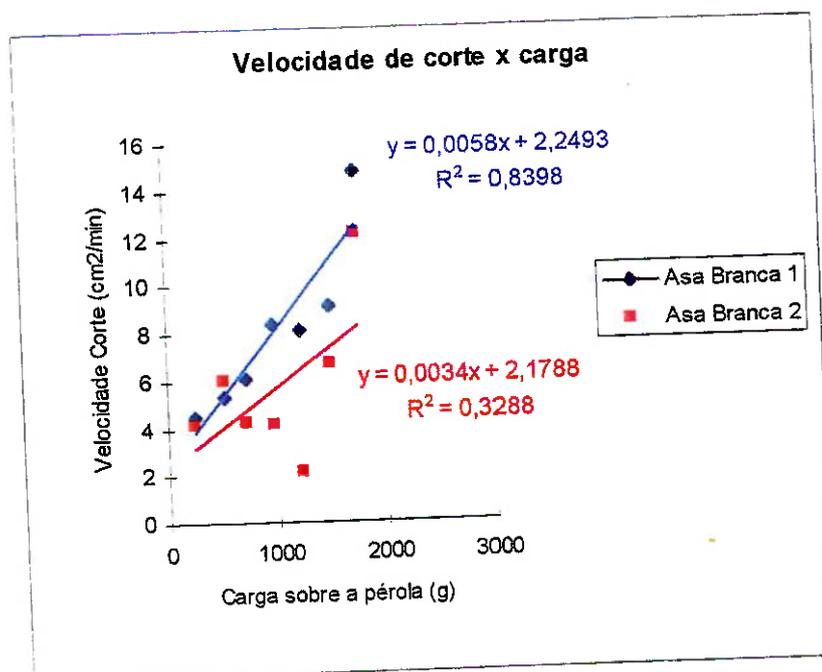
As tabelas 5.12 e 5.13 apresentam, em anexo, os resultados e comparações dos ensaios realizados com o granito Asa Branca, utilizando dois tipos de elementos diamantados (“co-fi-plast” e “diamond board”). Cabe

ressaltar que, nos ensaios realizados com as amostras dos granitos Red Symphony e Casa Blanca foram utilizadas tão somente as pérolas diamantadas do fio de marca "co-fi-plast", por estas terem apresentado o melhor resultado com o granito Asa Branca e este, por sua vez, possuir um teor acentuado de quartzo.

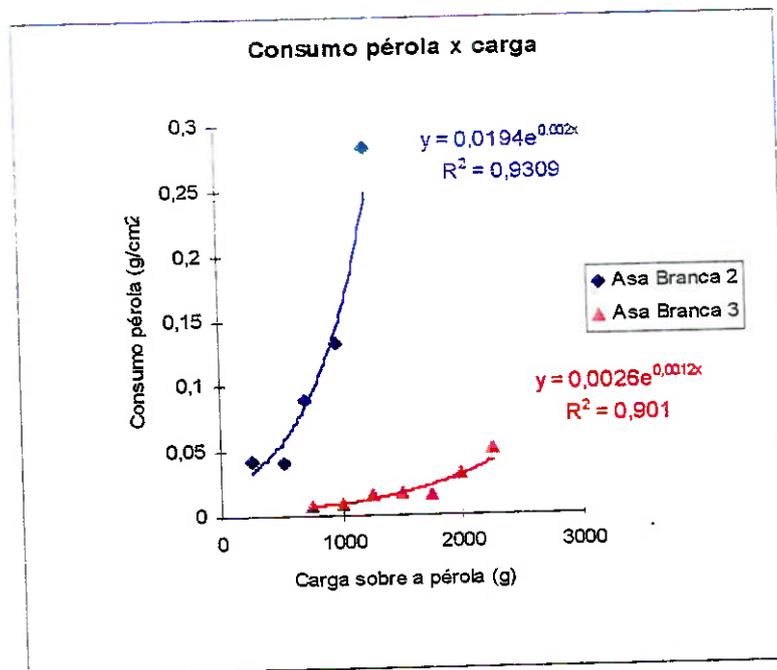
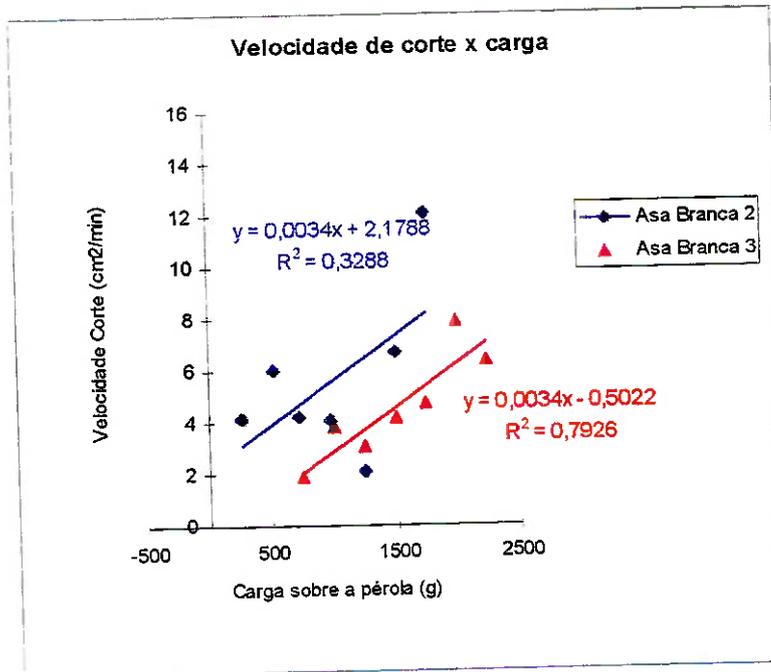
Na tabela 5.14 está apresentado o confronto dos parâmetros obtidos com os granitos estudados, utilizando como elementos abrasivos o fio diamantado marca "co-fi-plast". A figura 5.12 mostra o comportamento de cada granito levando em consideração a velocidade de corte e consumo de pérolas em relação ao teor de quartzo e à dureza da amostra.

TABELA 5.14 – CONFRONTO DOS PARÂMETROS OBTIDOS COM OS GRANITOS ESTUDADOS

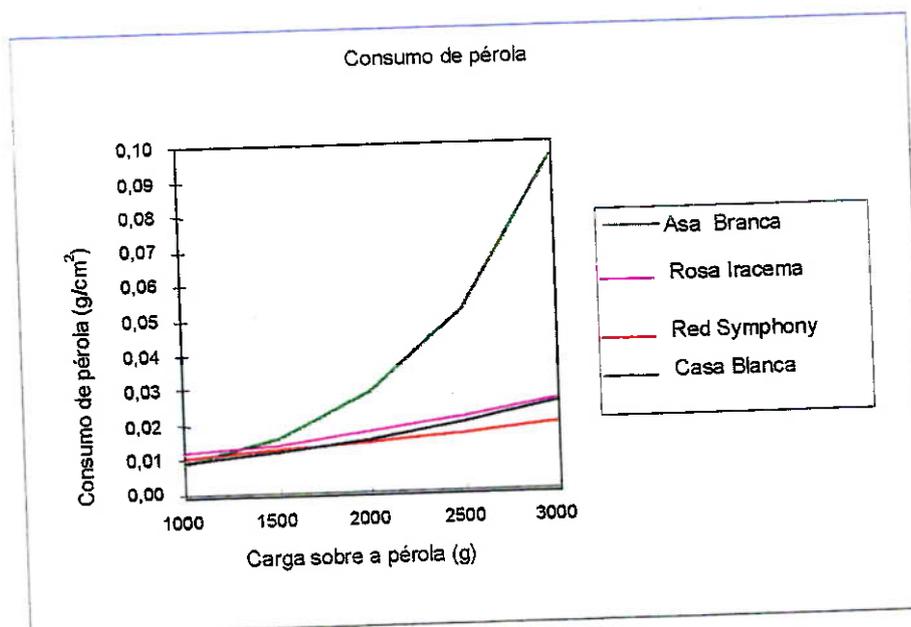
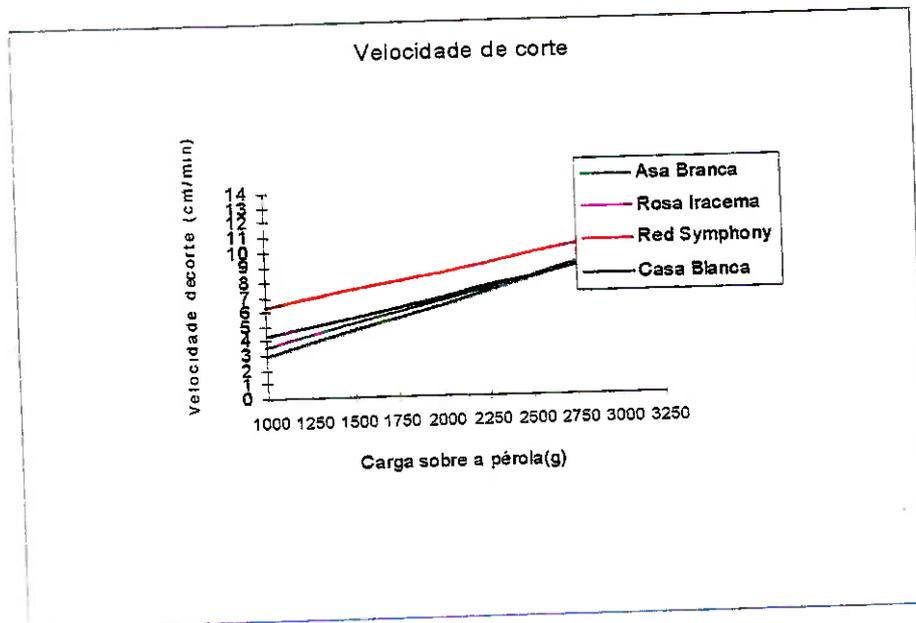
Granito	Velocidade de corte (cm ² /min)					Consumo de pérola (g/cm ²)					Teor de quartzo	Dureza Mohs média
	Carga (g)					Carga (g)						
	1000	1500	2000	2500	3000	1000	1500	2000	2500	3000		
Asa Branca	2,8978	4,5978	6,2978	7,9978	9,6978	0,008632	0,015729	0,02866	0,052222	0,095155	30	5,69
Rosa Iracema	3,4897	5,0397	6,5897	8,1397	9,6897	0,011487	0,01403	0,017137	0,020931	0,025565	29	6,10
Red Symphony	6,248	7,348	8,448	9,548	10,648	0,010394	0,012076	0,01403	0,016301	0,018939	22	5,51
Casa Blanca	4,2266	5,5266	6,8266	8,1266	9,4266	0,009233	0,011855	0,015222	0,019546	0,025097	23	5,91



FIGURAS 5.8 – PRIMEIRA COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE VELOCIDADE DE CORTE E CONSUMO DAS PÉROLAS OBTIDAS UTILIZANDO OS ELEMENTOS ABRASIVOS DA “CO-FI-PLAST” E “DIAMOND BOARD”



FIGURAS 5.9 – SEGUNDA COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE VELOCIDADE DE CORTE E CONSUMO DAS PÉROLAS OBTIDAS UTILIZANDO OS ELEMENTOS ABRASIVOS DA “CO-FI-PLAST” E “DIAMOND BOARD”



FIGURAS 5.13 – COMPORTAMENTO DA VELOCIDADE DE CORTE E DO CONSUMO DO ABRASIVO “CO-FI-PLAST” NOS GRANITOS ESTUDADOS

Na análise das quatro curvas, figura 5.12, quanto à velocidade de corte e ao consumo da pérola marca “co-fi-plast”, verifica-se que enquanto a eficiência da operação do corte aumenta no sentido Asa Branca , Rosa Iracema, Casa Blanca, Red Symphony (seqüência das curvas plotadas a partir da mais próxima do eixo das abcissas) o consumo da pérola marca “co-fi-plast” decresce no sentido inverso.

As figuras 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16, em anexo, apresentam as correlações entre a velocidade de corte e o consumo de pérolas diamantadas em função do percentual de quartzo e índice de dureza.

6. CONCLUSÕES

A produção de blocos no Ceará não é suficiente para o abastecimento das usinas de beneficiamento do Estado. Isto se deve, em grande parte, à falta de conhecimento geológico dos depósitos, do qual depende a preparação da jazida para o desenvolvimento da lavra.

Na ocasião das visitas técnicas realizadas às pedreiras de granitos do Ceará verificou-se que as mesmas carecem de pesquisa mineral de detalhe para associar as características da jazida com o plano de aproveitamento econômico, e ainda, de tecnologia adequada para lavra de maciços rochosos.

Nessa investigação, propôs-se avaliar a qualidade dos elementos abrasivos de fios diamantados, fabricados no mercado externo, com as amostras de granitos do Ceará para uma futura utilização desta tecnologia. Foi realizada, inicialmente, a caracterização tecnológica das amostras, sendo as mesmas consideradas em condições de representar as jazidas das quais foram coletadas.

A difusão industrial da tecnologia avançada de fio diamantado para produção de blocos de granitos na mina está subordinada a dois importantes parâmetros: velocidade de corte do granito suficientemente elevada e consumo dos elementos abrasivos compatível com o custo unitário da operação.

Houve um progresso de conhecimento tecnológico, nos últimos cinco anos, por conta de ações concatenadas do governo e empresários, das quais se destaca a contribuição técnico-científica dada pela Universidade de Cagliari, Itália. As pesquisas realizadas em laboratório contribuíram para elucidar o mecanismo de corte e o processo de desgaste, sob condições experimentais variáveis.

Com base nessa pesquisa, a partir dos dados de velocidade de corte dos diferentes tipos de granitos do Ceará e do consumo das pérolas diamantadas de marcas "co-fi-plast" e "diamond board", pôde-se concluir o seguinte:

- o granito Asa Branca deu melhor resultado com a pérola marca "co-fi-plast", que teve uma ação de corte no material superior à pérola marca "diamond board", principalmente para carga superior a 1.000g;
- a pérola diamantada "co-fi-plast" apresentou um consumo tolerável até a carga de 2.000 g;
- a velocidade de corte e o consumo das pérolas diamantadas são correlacionados com o percentual de quartzo para determinados valores de carga aplicada;
- observou-se, em particular com respeito ao percentual de quartzo, uma forte correlação com as características petrográficas e mineralógicas da rocha versus velocidade de corte para valores de carga até 2.000g;

- verificou-se que a velocidade de corte diminui em função do aumento do percentual de quartzo;
- verificou-se, também, que o consumo da pérola aumenta em função da quantidade de quartzo;
- existem, no mercado de abrasivos de fios diamantados, utensílios de qualidade bastante inferior aos especificados pelos fabricantes;
- verificaram-se, em estudos realizados para o mesmo fio diamantado, diferenças acentuadas no número de diamantes em anéis de pérolas;
- as empresas que fabricam fios diamantados não demonstram ter capacitação nem tão pouco estrutura laboratorial para estudar o desgaste das pérolas diamantadas, correlacionando-os com os granitos de diferentes tipos petrográficos;
- os fios diamantados vendidos no mercado não foram fabricados para granitos brasileiros e, geralmente, não se mostram adequados para os mesmos;
- a caracterização dos elementos diamantados, em laboratório, possibilitou a determinação da grande variação de diâmetros, distribuição, e número de diamantes por anéis num mesmo fio diamantado.

Dessa forma, concluiu-se da necessidade de fabricar no Brasil o equipamento de ensaio de abrasivos de fios diamantados em escala de laboratório já desenvolvido no Departamento de Geoengenharia e Tecnologia

Ambiental da Universidade de Cagliari, Itália, especialmente para essa finalidade. Pois não se justifica, com a quantidade de pedreiras existentes no País, substituindo as suas técnicas rudimentares de extração por técnicas mais avançadas, em particular o fio diamantado, ficar dependendo de ensaios que devem ser realizados na Itália, elevando significativamente os seus custos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. STELLIN JÚNIOR. A.; CARANASSIOS. A extração de rochas ornamentais. *Brasil Mineral*, São Paulo, n. 89, p 30-34, 1991.
2. CAPUZZI, Q. **Moderne technology and machinery for quarrying**. Benetti Macchine. S.r.l. Carrara, 1988, p.95
3. BLASI, P. *et al.* Applicazioni di metodologie de prospezioni geomineraria alla ricerca ed alla valorizzazione di depositi de pietri ornamentali. **ATTI DELLE GIORNATE DI STUDIO**, Convegno Internazionale Su: **Situazione e Prospettive Dell' Industria Lapidea**, A.N.I.M., **Anais**.Cagliari, 1989, p.105-113.
4. BRADLEY, F. **Cenni sull' analisi geologica delle rocce ornamentali**. Technostone S.p.A., Carrara, 1989, p.91
5. CICCU, R. 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, 1989. **Anais**. Cagliari, 1989, p.165-177.
6. BORTOLUSSI, A. *et al.* Influenza delle caratteristiche petrografiche e strutral sulla resa di cava e la distribuizione del volume del blocchi. In: **CONGRESSO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MINAS**, 2., Cagliari, 1990. **Anais**. Cagliari, 1990. p.9-19.

7. CICCUC, R. *et al.* Studio dell' Organizzazione di una cave di Granito in Sardegna. In: IV Convegno Nazionale su Attività Estimativa e Defesa del Suolo. Saint-Vincent, 1986. **Anais.** Saint-Vincent, 1986. p. 172-179.
8. BORTOLUSSI. A. *et al.* Improved Technology and Planning in Modern Stone Quarrying. In: SYMPOSIUM ON MINE PLANNING AND EQUIPMENT SELECTION, Balkema, 1988. **Anais.** Rotterdam, p. 107 - 119.
9. CICCUC, R. *et al.* Moderne tecniche di estrazione dei lapidei ornamentali e problemi di impacto ambientali in Italia. In: SIMPÓSIO E.P.U.S.P. SOBRE CONTROLE AMBIENTAL E SEGURANÇA EM MINERAÇÃO, São Paulo. 1989. **Anais,** São Paulo, 1989. p. 51-65.
10. BORTOLUSSI. A. *et al.*. Escavazione e preparazione du blocchi di granito. **Marmi Graniti, Pietre,** Carrara, n. 162, p. 17 – 33, 1989
11. CARANASSIOS, A.; CICCUC, R. Tecnologia de extração e valorização das rochas ornamentais. **Rochas de Qualidade,** São Paulo, n. 109, p.58- 77, 1992.
12. CARANASSIOS A. Applicazione di tecnologie avanzate per il taglio del granito. **Tesi di dottorato.** Cagliari, 1993. Università Degli Studi di Cagliari. Cagliari, 1993, 368p.

13. ALENCAR, C.R.A., CARANASSIOS A; CARVALHO D.L.C. **Estudo econômico sobre rochas ornamentais, tecnologias de lavra e beneficiamento.** v.3, Fortaleza, Instituto Euvaldo Lodi da Federação das Indústrias do Estado do Ceará. Fortaleza, 1996, 225p.
14. CHIODI FILHO. C. **Aspectos técnicos e econômicos do setor de rochas ornamentais.** n. 28 Série Estudos e Documentos, CETEM/CNPq, Rio de Janeiro. 1995, 75p.
15. SMITH, M. Dimensional stone blasting in Finland. **Mining Magazine,** p.312-317. 1987.
16. BERGMANN, O. R. ; RIGGLE, J. W.; Wu, F.C. **Model rock blasting-effect of explosives properties and other variables on blasting results.** Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech, v. 10, p.585-612. Printed in Great Britain Pergamon Press 1973.
17. WARBURTON, P. M. **Mathematical approaches to analysing effects of blasting on slope stability.** Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, n. 51, Australia, 1977.
18. KUTTER H. K.; FAIRHURST, C. **On the fracture process in blasting.** Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech, v. 8, p.181-202, 1971.

19. BROWN, A. N. Theory of blasting as applied to open pit mines. In SYMPOSIUM ON PLANNING OPEN PIT MINES, Johannesburg, 1970. Proceedings. p.115-120.
20. LAMBOOY, P.; ESPLEY, JONES R. C. Pratical considerations of blasting in open cast mines. SYMPOSIUM ON PLANNING OPEN PIT MINES, Johannesburg, 1970. Proceedings. p.227-234.
21. PERSSON, P. A.; LUNDBORG, N.; JOHANSSON, C. H. The basic mechanisms in rock blasting. CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS, 2, Belgrade, 1970. Proceedings. **Paper n. 5-3.**
22. ITO, I. *et al.* **Rock breakage by smooth blasting.** In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS, 2, Belgrade, 1970. Proceedings. **Paper n. 5-6.**
23. CARDU, M. Il Método della miccia detonante per il taglio del granito: análise di procedure correnti In: CONFERENZA EUROPEA SULLE CAVE, 1., - Eurocave, A.N.I.M., Saint Vincent, 1992 **Anais.** Saint Vincent, 1992, p. 184 - 187.
24. TAMROCK lança equipamento Slot Drill SD 600. **Rochas de Qualidade,** São Paulo. n. 102, p.56-59, 1990.

25. EXTRATOR de blocos: Um equipamento novo e revolucionário. **Rochas de Qualidade**, São Paulo, n. 113, p.25-31. 1993.
26. DUARTE, G.W. Método de lavra determina a eficácia do rendimento. **Rochas de Qualidade**, São Paulo, n. 138, p.91-110, 1998.
27. VIDAL, F.W.H. A indústria extrativa de rochas ornamentais no Ceará. **Dissertação de mestrado**. São Paulo, 1995. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995, 178 p.
28. CICCUCI, R. Tecnologia avanzate per la coltivazione e la lavorazione dei lapidei. In: 1ª CONFERENZA EUROPEA SULLE CAVE - EUROCAVE, A.N.I.M., Saint Vincent **Anais**. Saint Vincent, 1992, p. 211 - 220.
29. CICCUCI, R. Processi di alterazione e rimedi al degrado del manufatti lapidei. In: CONGRESSO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MINAS, 3., Verona. 1994. **Anais**. Verona, 1994. p.294-297.
30. CAPUZZI, Q. Una tecnologia nella escavazione dei marmi apuani: Le Tagliatrici a filo diamantato. Atti delle Giornate di Studio, Il CONVEGNO NAZIONALE SU: LE ATTIVITA ESTRATTIVE E LA PROBLEMÁTICA DEL TERRITORIO, A.N.I.M., Bergamo, 1983. **Anais**. Bergamo, 1983 24-26, novembro 1983.

31. BERTOLINI, R. *et al.* Le moderne tecnologie nella estrazione lapidea nazionale ed. internazionale. Convegno internazionale la cava nel 2000. Tra innovazione tecnologica e nuove dinamiche di mercato. FEIRA INTERNAZIONALE MARMI E MACCHIN CARRARA, 7., Carrara, 1986.
32. CRESPO, A. Novas tecnologias para extração de rochas ornamentais. **Rochas & Equipamentos**, Lisboa, n. 24, p.122-136, 1991.
33. CARANASSIOS, A. Utilização do fio diamantado como tecnologia avançada para extração de granitos para fins ornamentais. **Rochas de Qualidade**, São Paulo, n. 106, p.79-85, 1991.
34. BORTOLUSSI, A. *et al.* Prestazioni e usura del filo diamantato nel taglio dei graniti. In: CONGRESSO INTERNAZIONALE DI GEOINGEGNERIA, Torino, 1989. **Anais**. Torino, 1989, p.195-200.
35. THOREAU, B. L'utilizzazione del filo diamantato nelle cave di granito. ATTI DELLE GIORNATE DI STUDIO, Convegno Internazionale Su: Situazione e Prospettive Dell' Industria Lapidea, A.N.I.M., Cagliari, 1989 **Anais** Cagliari, 1989, p.15-18.
36. FORNARO, M. *et al.* Studio sperimentale del funzionamento del filo elettodeposto nel taglio delle oficalciti. In: CONGRESSO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MINAS, 1., Cagliari, 1990. **Anais**. Cagliari, 1990, p.307-331.

37. BARANA, F.; BIASCO, G.L. Stato attuale e prospettive di applicazione del Filo Diamantato nel Taglio dei Materiali Lapidei del Piemonte e Della Valle D'Aosta. **Marmo Macchine**, Milano-Itália, n. 108, p. 106-112, 1992.
38. BERRY, P. *et al.* **Optimum use of diamond wire equipment in stone quarrying**. 21st Int. Symp., Las Vegas, SME AIME, 1989 Proceedings. p 351 – 365.
39. BORTOLUSSI *et al.* Il taglio al monte del granito con Il filo diamantato: Risultati dell'esperienza sarda. Atti delle giornate di studio, convegno internazionale. **Anais Cagliari**, 1989 p.243-247
40. DUARTE, G. W. Uso e desempenho do fio diamantado em maciço rochoso. **Rochas de Qualidade**, São Paulo, n. 115, p.93-97, 1993.
41. CICCURI. Granite slotting in the quarry using water jet. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA PEDRA NATURAL, 1, Lisboa 1995. **Anais**. Lisboa, 1995. p. 169-164
42. SUMMERS, D.A. Water jet use in quarrying. ATTI DELLE GIORNATE DI STUDIO, Convegno Internazionale Su: Situazione e Prospettive Dell' Industria Lapidea, A.N.I.M., **Anais Cagliari**, 1989, p.9-14.

43. AGUS.M *et al*. Caratteristiche minero-petrografiche e disgregabilità dei graniti con la tecnologia water jet. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA NA ENGENHARIA E INDUSTRIA MINERAL, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. USP, São Paulo, 1990 p. 181-183
44. RUSSO, S. Máquina para corte com água a alta pressão em pedra de granito ou mármore. **Rochas & Equipamentos**, Lisboa, n. 33, p.39-43, 1994.
45. BORTOLUSSI. A. Studio dell' influenza della porosità nel taglio dei graniti con la tecnologia waterjet. In: CONGRESSO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MINAS, 2., São Paulo, 1993. **Anais**. São Paulo, 1993. p.713-723.
46. CICCUCI, R. Waterjet in ornamental stone engineering. In: CONGRESSO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MINAS, 2., São Paulo, 1993. **Anais**. São Paulo, 1993. p.407-424.
47. MIRANDA, R.M. Corte e marcação de pedras naturais por laser. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA PEDRA NATURAL, 1., Lisboa 1995. **Anais**. Lisboa, 1995. p.186 -189.

48. MANCINI, R. *et al.* Hard dimension stone quarrying by detonating cord and by diamond wiresaw: A comparison of theoretical approaches and forecasts to actual quarry practice results. In: CONGRESSO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MINAS, 2., São Paulo, 1993. **Anais.** São Paulo, 1993. p.381-391.
49. AGUS M. *et al.* Aspetti di meccanica del taglio dei graniti con le tecnologie innovative. In: |||CONVEGNO DI GEOINGEGNERIA SCAVO IN ROCCIA, 3.. Torino, 1992. p.264-274.
50. BERRY P. *et al.* Industrial viability of soft technologies for hard stone quarrying. WORLD MINING CONGRESS,15., Madrid, 1992. Proceedings. p.533-542.
51. BORTOLUSSI, A. *et al.* Oganizzazione razionale dell'attivit  di cava mediante tecniche di simulazione In: CONGRESSO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MINAS, 1., Cagliari, 1990. **Anais.** Cagliari, 1990, p.351-361.
52. CARANASSIOS, A. *et al.* Prospective di innovazione tecnologica nelle cave di granito brasiliane. In: CONGRESSO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MINAS, 2., São Paulo, 1993. **Anais.** São Paulo, 1993. p.357-377.

53. CARANASSIOS. A.; STELLIN JÚNIOR, A.; AYRES DA SILVA, L. A.
Considerações acerca do estado de tensões dos maciços na lavra de rochas ornamentais. In: CONGRESSO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MINAS., 3., Verona, 1994. **Anais.** Verona, 1994. p. 283-285.
54. MODERN technology to uncover earth's stone. Stone World. New York, august, 1993, p.75-82, 1993.
55. CHIODI FILHO. C.; ONO. P. A. Tipos de lavra e técnicas de corte para desmonte de blocos. Rochas de Qualidade, São Paulo, n. 120, p.93-106, 1995.
56. KOPPE, J. C; NOVA, P.A.C; COSTA, J. F. C .L. Projeto e recuperação de área degradada por lavra de granito ornamental em Viamão/RS, Brasil. In: CONGRESSO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MINAS, 2., São Paulo, 1993. **Anais.** São Paulo, 1993, p. 395-404.
57. WILKS, J.; WILKS, E. **Properties and applications of diamond.** Butterworth Heinemann. Oxford 1990, p.523.

58. BORTOLUSSI. A. *et al.* Valutazione delle prestazioni del filo diamantato mediante prova di laboratorio. Atti DELLE GIORNATE DI STUDIO, Convegno Internazionale su: Situazione e Prospective Dell' Industria Lapidea, A.N.I.M., **Anais**, Cagliari, 1989, p. 219-223.
59. BORTOLUSSI, A. *et al.* Progress in the Knowledge of Granite Cutting with Diamond Wire. International Conference on Ground control in Mining, 11, Wollongong, 1992. Proceedings, p 593 – 599.
60. BORTOLUSSI A. *et al.* Computer simulation of diamond-wire cutting of hard and abrasive rock. In: Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy. London, 1991. **Anais**. London, 1991, p.55-128.
61. BORTOLUSSI A. *et al.* **Computer-simulated diamond wire cutting operation. Int. Conf. on Computer Solutions in Mining and Processing.** Leeds, UK, 1991.
62. BORTOLUSSI, A. *et al.* **Simulation and optimization of rock cutting with diamond wire. In: Proceedings. 22st APCOM, Berlinvol. III., p 163 – 176, 1990.**
63. AGUS, M. *et al.* Ricerche sperimentali sull'usura delle perle diamantate nel taglio dei graniti. Atti della CONFERENZA EUROPEA SULLE CAVE, 1., Eurocave 92, Saint-Vicent, **Anais**. Saint-Vicent - Italia, 1992. p. 221-224

64. CICCUCI, R. *et al.* Valutazione Sperimentale Delle Caratteristiche di lavoro Degli Utensili Diamantati. In: CONGRESSO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MINAS, 4. Canela-RS, **Anais**. Canela, 1996, p. 131 - 139.
65. VIDAL, F. W. H. *et al.* Caracterização tecnológica das rochas ornamentais do Ceará. In: CONGRESSO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MINAS, 4. Canela-RS, **Anais**. Canela, 1996, p. 174 - 183.
66. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (NBR 12768). Rochas para revestimento - Análise petrográfica. 1992.2p.
67. _____ (NBR 12766). Rochas para revestimento - Determinação da massa específica aparente , porosidade aparente e absorção d'água. 1992.2p.
68. _____ (NBR 12763). Rochas para revestimento - Determinação da resistência à flexão. 1992. 3p.
69. _____(NBR 12764). Rochas para revestimento - Determinação da resistência ao impacto de corpo duro. 1992.2p.

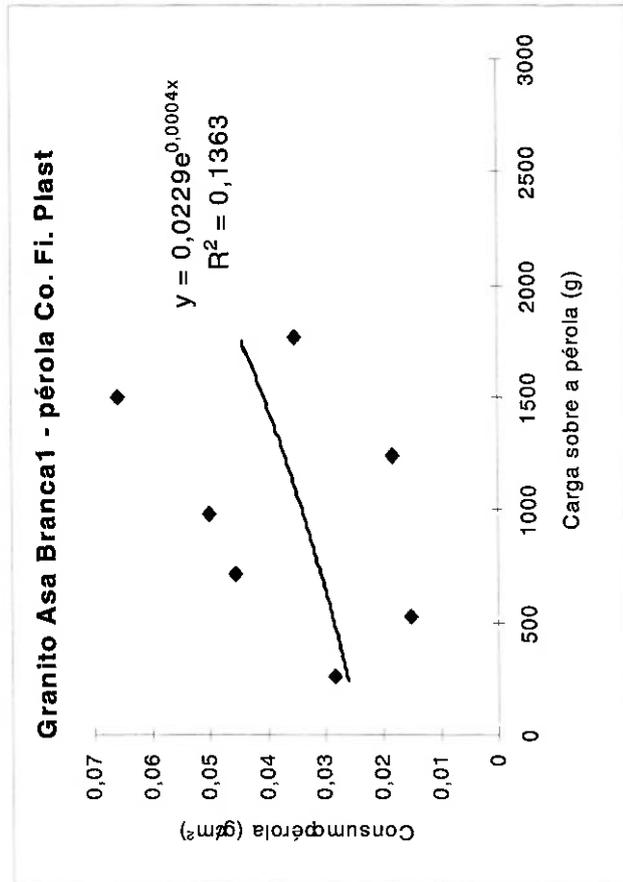
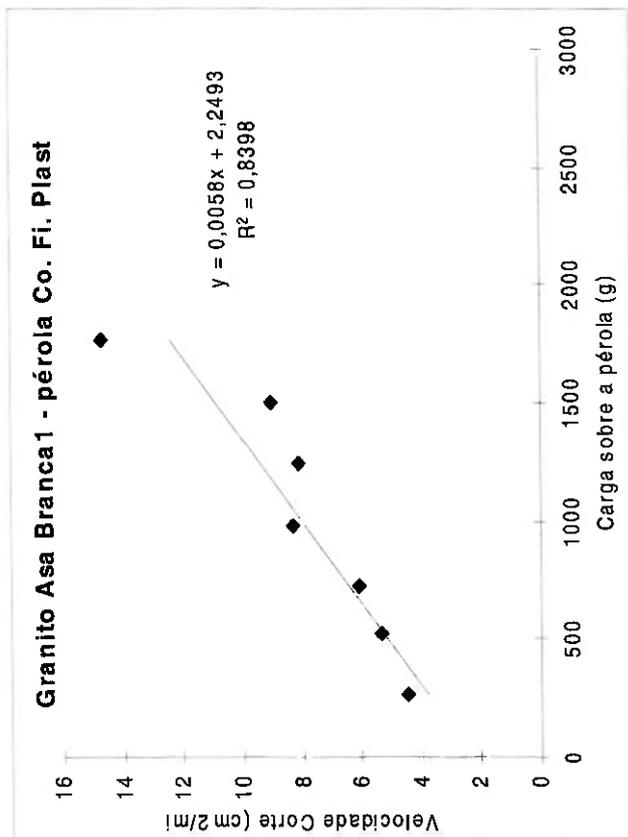
70. _____ (NBR 12767). Rochas para revestimento - Determinação da resistência a compressão uniaxial. 1992.2p.
71. _____ (NBR 12765). Rochas para revestimento - Determinação do coeficiente de dilatação térmica linear. 1992.3p
72. _____ (NBR 12769). Rochas para revestimento - Ensaio de congelamento e degelo conjugado a verificação da resistência à compressão uniaxial. 1992. 2p.
73. _____ (NBR 12642). Rochas para revestimento - Determinação do desgaste por abrasão. 1992.3p
74. _____ (NBR 10341). Rochas para revestimento - Determinação do módulo de deformabilidade estática. 1992.3p.
75. AIRES-BARROS, L. **Alteração e alterabilidade de rochas**. Instituto Nacional de Investigação Científica. Centro de Petrologia e Geoquímica da Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa,1991,384p.
76. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM (C 615). Standard specification for granite dimension stone. 1992.

77. FRAZÃO, E.; FARJALAT, J. E. S. Características tecnológicas das principais rochas silicáticas brasileiras usadas como pedras de revestimento. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA PEDRA NATURAL. 1., Lisboa, 1995, **Anais**. Lisboa, 1995. p. 47-58.

ANEXO

TABELA 5.5 – ENSAIOS DO GRANITO ASA BRANCA 1 UTILIZANDO O ELEMENTO ABRASIVO “CO-FI-PLAST”.

Ensaio nº	1	2	3	4	5	6	7
carga (g)	262	523	719	981	1243	1504	1766
corte(cm ² /min)	4,4881	5,3405	6,0746	8,3375	8,121	9,0757	14,719
consumo pérola(g/cm ²)	0,028364	0,015308	0,045468	0,050038	0,018429	0,065871	0,035324



FIGURAS 5.3 – EFEITO DA VELOCIDADE DE CORTE E CONSUMO DAS PÉROLAS

TABELA 5.6 – ENSAIOS DO GRANITO ASA BRANCA 2 UTILIZANDO O ELEMENTO ABRASIVO “DIAMOND BOARD”.

Ensaio n°	1	2	3	4	5	6	7
tipo pérola	d. board						
carga (g)	262	523	719	981	1243	1504	1766
corte(cm ² /min)	4,1163	5,9835	4,1769	4,094	2,0759	6,6572	12,0966
consumo pérola(g/cm ²)	0,042	0,0413	0,0883	0,1321	0,282	0,0783	0,0271

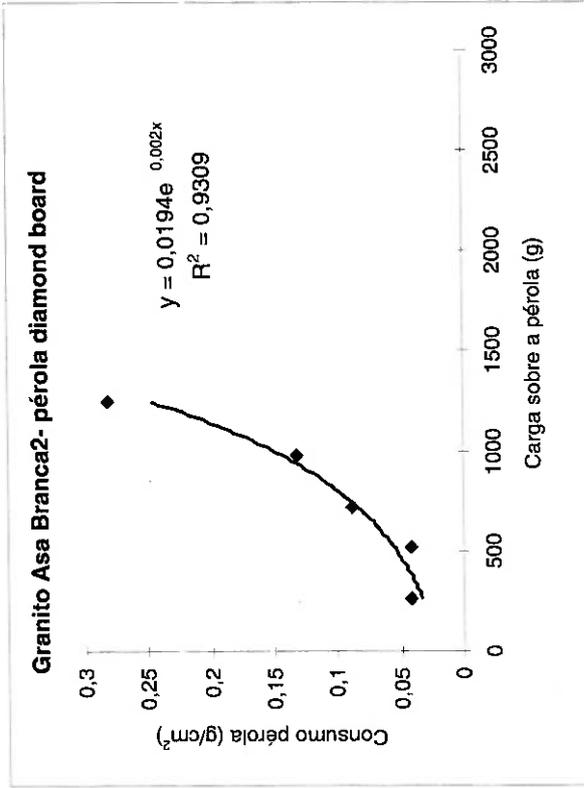
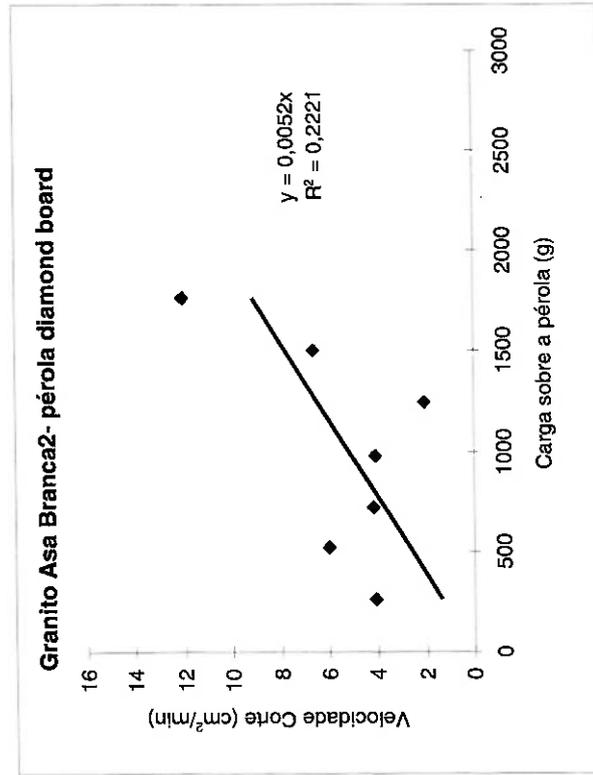


FIGURA 5.4 – EFEITO DA VELOCIDADE DE CORTE E CONSUMO DAS PÉROLAS

TABELA 5.7 – ENSAIOS DO GRANITO ASA BRANCA 3 UTILIZANDO ELEMENTO ABRASIVO “CO-FI-PLAST”

Ensaio nº	1	2	3	4	5	6	7
Carga (g)	1750	2000	2250	1500	1250	1000	750
corde(cm ² /min)	4,693	7,8738	6,3775	4,1193	3,0409	3,7743	1,833
consumo pérola(g/cm ²)	0,0145	0,0318	0,0506	0,0159	0,0152	0,0083	0,0069

Obs: os valores dos ensaios da tabela abaixo a 2000 g e 1000 g de carga são as médias obtidas dos seguintes ensaios:

carga (g)	2000	2000	1000	1000
corde(cm ² /min)	5,5395	10,2082	4,6100	2,9387
consumo pérola(g/cm ²)	0,5885	0,4681	0,0999	0,0827

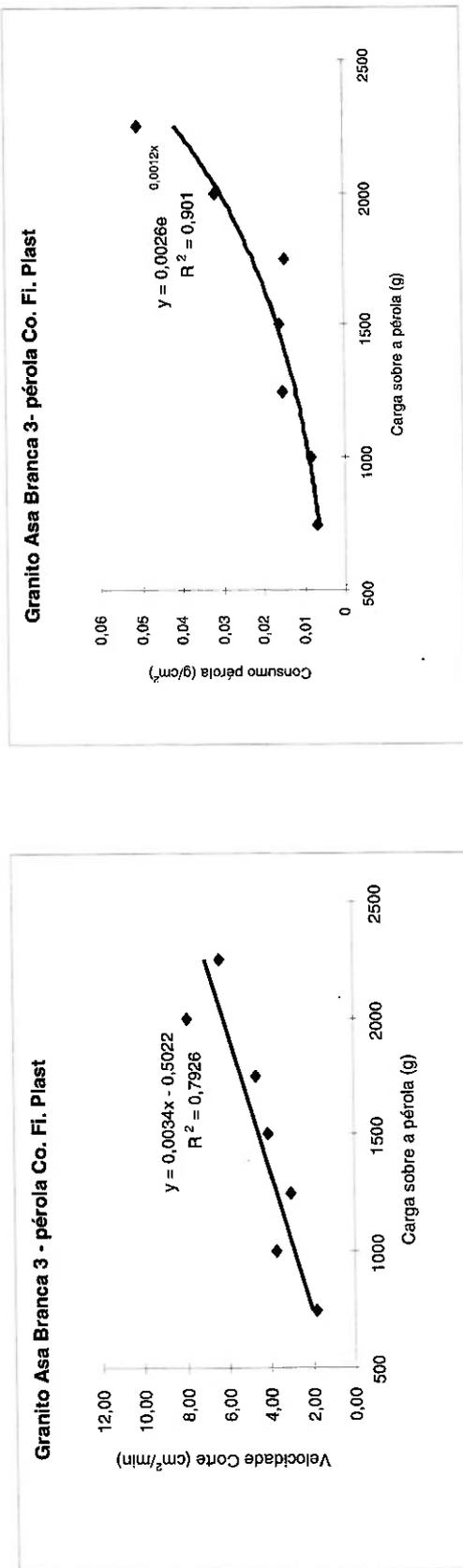


FIGURA 5.5 – EFEITO DA VELOCIDADE DE CORTE E CONSUMO DAS PÉROLAS

TABELA 5.8 - ENSAIOS DO GRANITO ROSA IRACEMA 1 UTILIZANDO O ELEMENTO ABRASIVO "DIAMOND BOARD".

Ensaio n°	1	2	3	4	5
tipo pérola	d. board				
carga (g)	262	523	719	981	1243
corte(cm2/min)	0,232889	0,093911	0,302259	0,339213	0,126191
consumo pérola(g/cm2)	0,795514	1,97279	1,665017	1,750168	6,864202

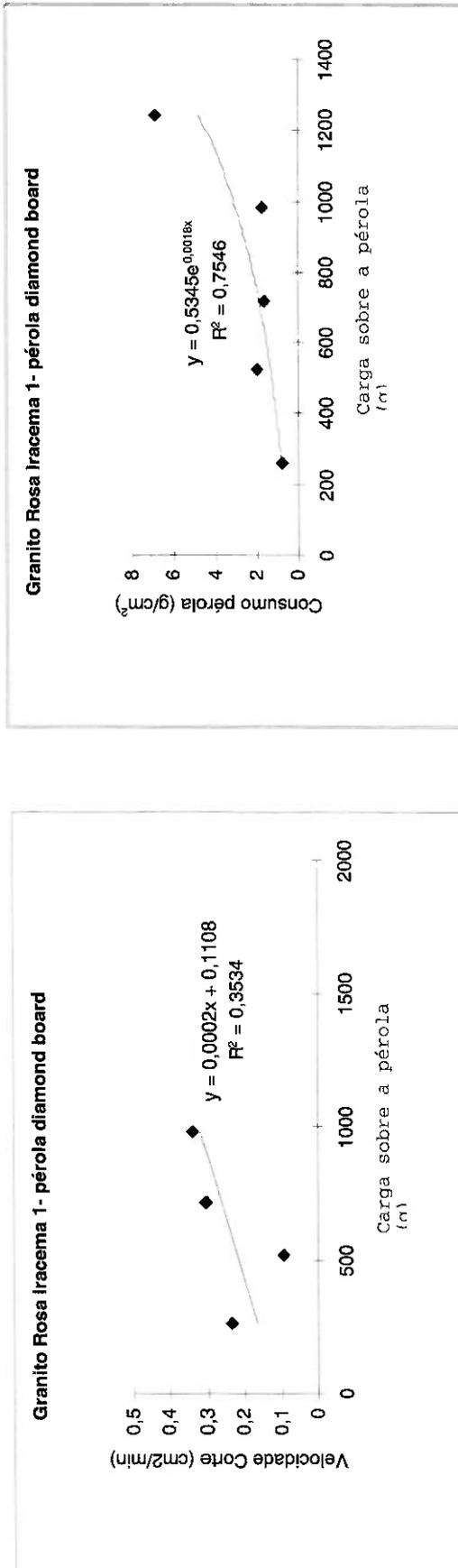


FIGURA 5.6 - EFEITO DA VELOCIDADE DE CORTE E CONSUMO DAS PÉROLAS

TABELA 5.9 – ENSAIOS DO GRANITO ROSA IRACEMA 2 UTILIZANDO O ELEMENTO ABRASIVO “CO-FI-PLAST”.

Ensaio nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
tipo pérola	cofiplast										
carga (g)	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
corde(cm ² /min)	1,3235	2,3326	3,8465	4,6208	6,4807	6,7331	4,0042	7,5848	8,2818	8,9355	9,7081
consumo pérola(g/cm ²)	0,0092	0,0088	0,0129	0,0121	0,0110	0,0122	0,0298	0,0238	0,0232	0,0190	0,0185

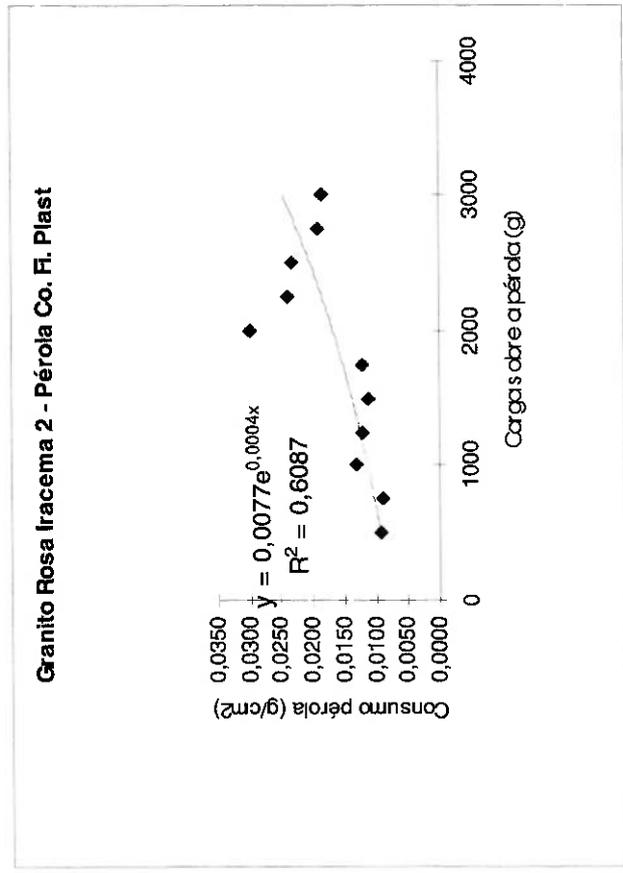
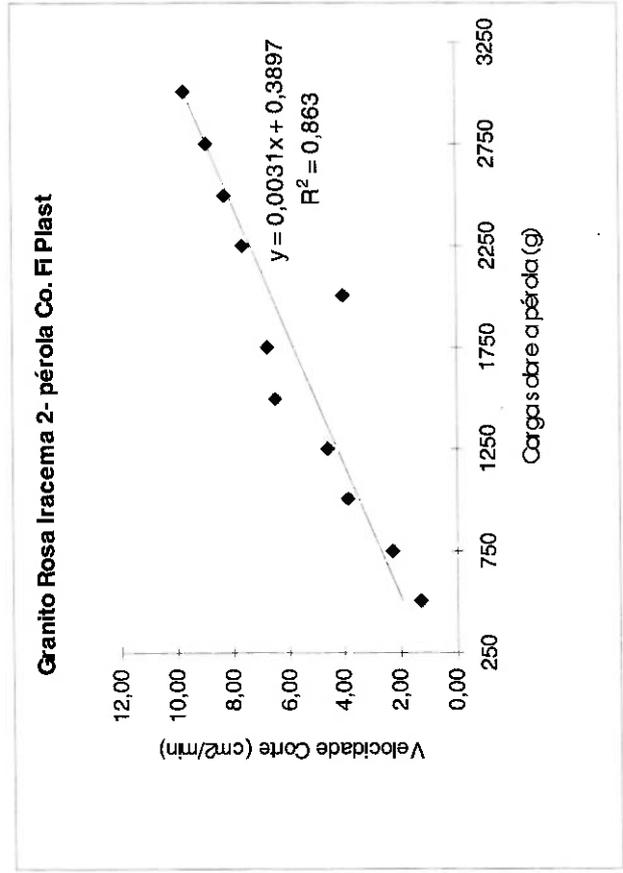


FIGURA 5.7 - EFEITO DA VELOCIDADE DE CORTE E CONSUMO DAS PÉROLAS

TABELA 5.10- ENSAIOS DO GRANITO RED SYMPHONY UTILIZANDO O ELEMENTO ABRASIVO "CO-FI-PLAST".

Ensaio nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Carga(g)	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
Corte(cm ² /min)	5,5423	4,4726	7,3804	6,9418	6,5439	9,3724	7,5361	9,5764	9,9359	9,3737	11,0501
Consumo pérola(g/cm ²)	0,00824	0,01042	0,010562	0,01008	0,01165	0,01553	0,01471	0,01505	0,01684	0,01696	0,01792

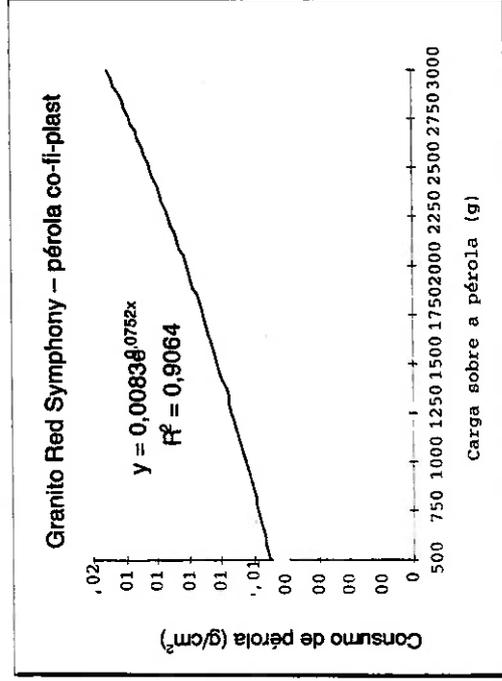
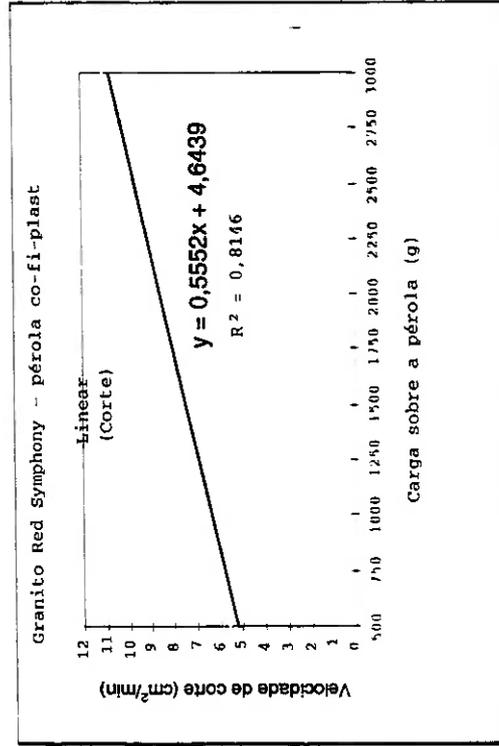


FIGURA 5.10 -- EFEITO DA VELOCIDADE DE CORTE E CONSUMO DAS PÉROLAS

TABELA 5.11- ENSAIOS DO GRANITO CASA BLANCA UTILIZANDO O ELEMENTO ABRASIVO "CO-FI-PLAST".

Ensaio n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Carga(g)	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750
Corte(cm ² /min)	3,0653	3,3205	4,0078	4,9237	5,8564	6,6426	6,8452	7,4078	8,2492	8,8305
Consumo pérola(g/cm ²)	0,008224	0,007772	0,009575	0,009053	0,012769	0,011668	0,019939	0,015653	0,019192	0,024097

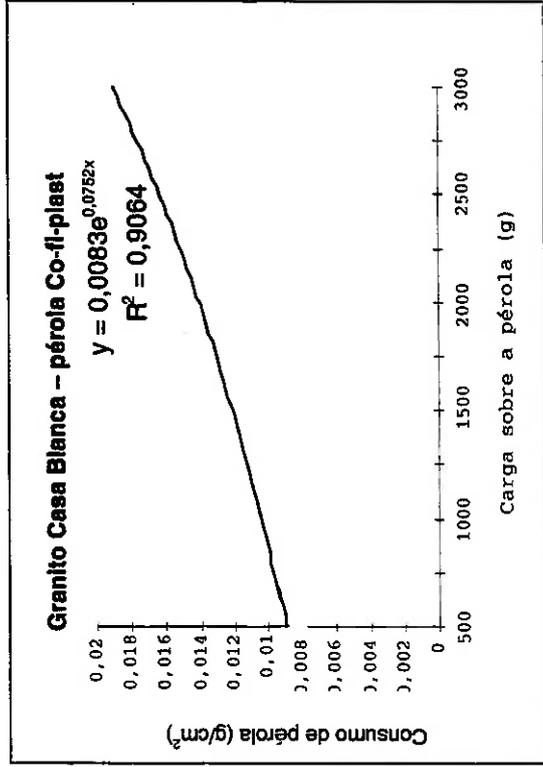
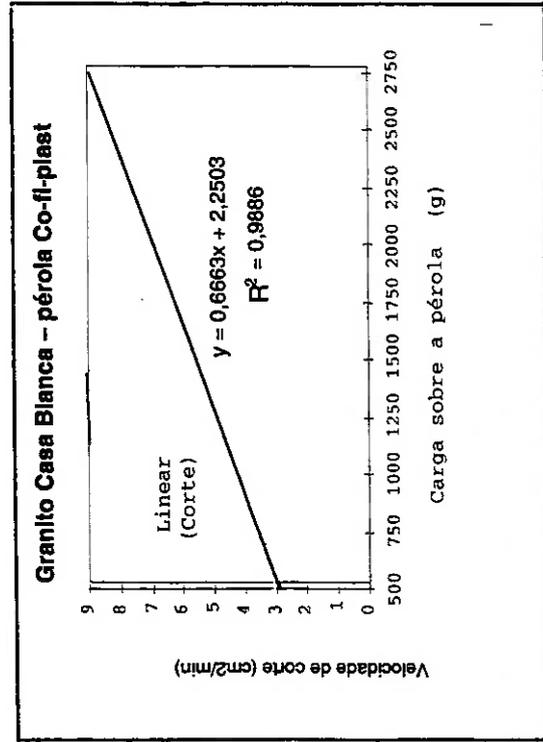


FIGURA 5.11 – EFEITO DA VELOCIDADE DE CORTE E CONSUMO DAS PÉROLAS

TABELA 5.12 – ENSAIOS COMPARATIVOS DO GRANITO ASA BRANCA 1 E ASA BRANCA 2

Granito	carga (g)	262	523	719	981	1243	1504	1766
Asa Branca 1	corde(cm ² /min)	4,4881	5,3405	6,0746	8,3375	8,121	9,0757	14,719
	consumo pérola(g/cm ²)	0,028364	0,015308	0,045468	0,050038	0,018429	0,065871	0,035324
Asa Branca 2	corde(cm ² /min)	4,1163	5,9835	4,1769	4,094	2,0759	6,6572	12,0966
	consumo pérola(g/cm ²)	0,042	0,0413	0,0883	0,1321	0,282	0,0783	0,0271

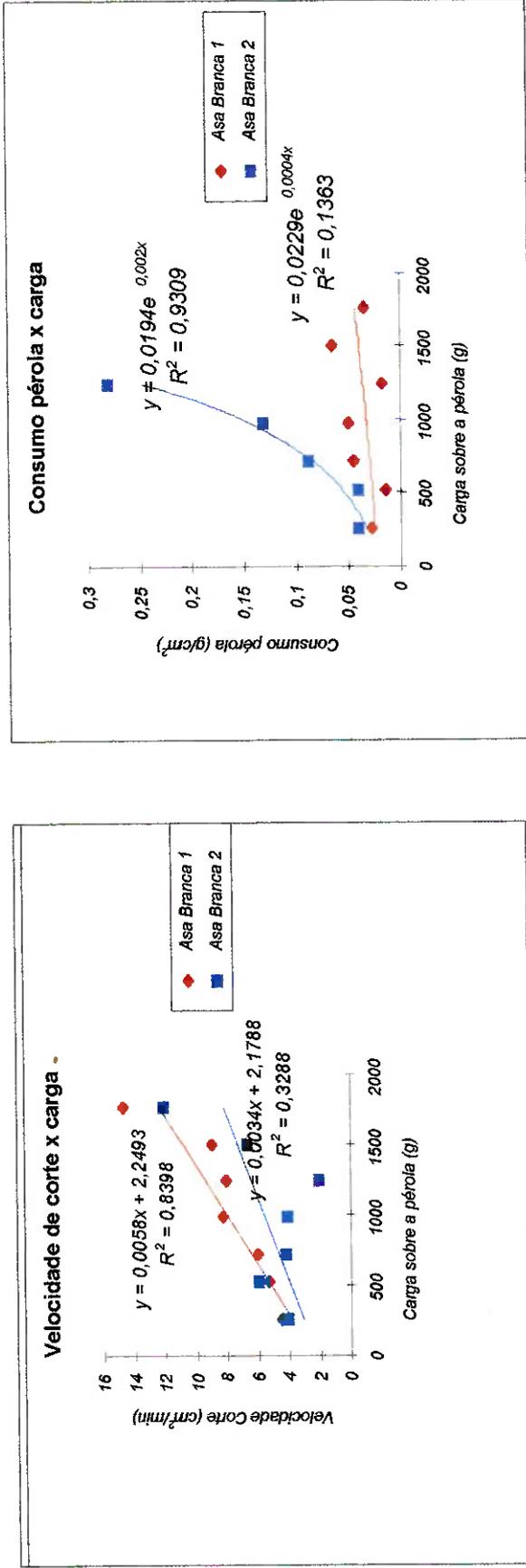


FIGURA 5.8 – PRIMEIRA COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE VELOCIDADE DE CORTE E CONSUMO DAS PERÓLAS UTILIZANDO OS ELEMENTOS ABRASIVOS DA “CO-FI-PLAST” E “DIAMOND BOARD”.

TABELA 5.13 - ENSAIOS COMPARATIVOS DO GRANITO ASA BRANCA 2 E ASA BRANCA 3

Granito	Carga (g)	262	523	719	981	1243	1504	1766
Asa Branca 2	Corte(cm ² /min)	4,1163	5,9835	4,1769	4,094	2,0759	6,6572	12,0966
	Consumo pérola(g/cm ²)	0,042	0,0413	0,0883	0,1321	0,282	0,0783	0,0271
Asa Branca 3	Carga (g)	1750	2000	2250	1500	1250	1000	750
	corte(cm ² /min)	4,693	7,8738	6,3775	4,1193	3,0409	3,7743	1,833
	Consumo pérola(g/cm ²)	0,0145	0,0318	0,0506	0,0159	0,0152	0,0083	0,0069

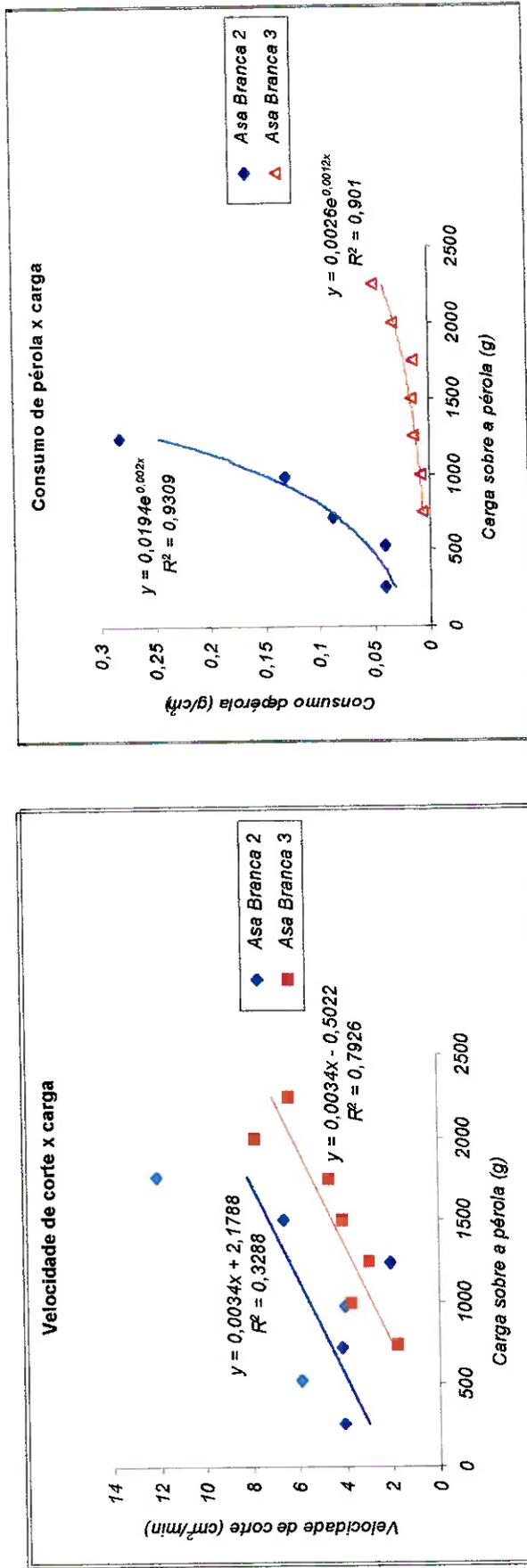


FIGURA 5.9-SEGUNDA COMPARAÇÃO DOS ENSAIOS DE VELOCIDADE DE CORTE E CONSUMO DAS PÉROLAS UTILIZANDO OS ELEMENTOS ABRASIVOS DO “CO-FI-PLAST” E “DIAMOND BOARD”.

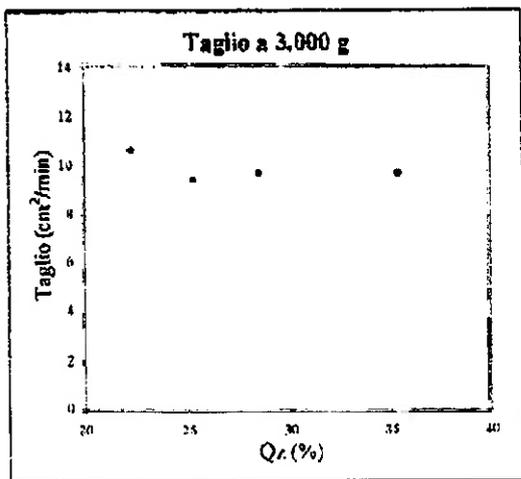
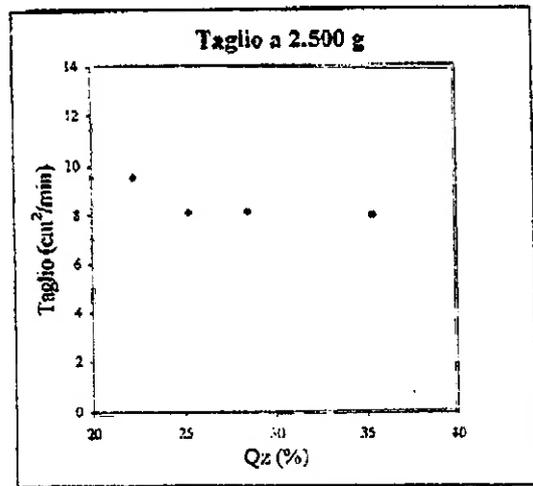
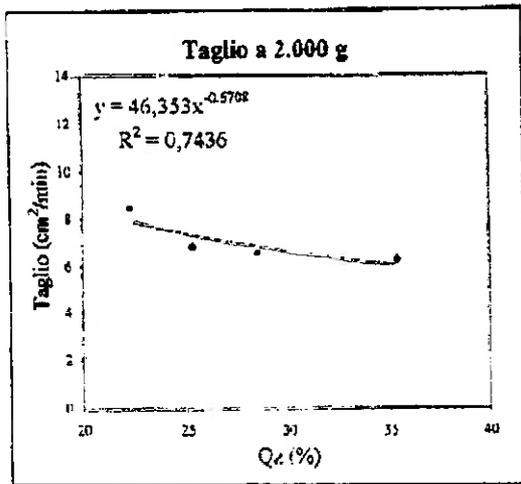
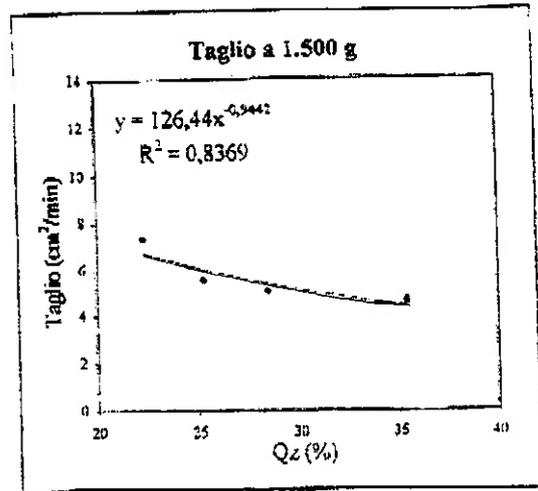
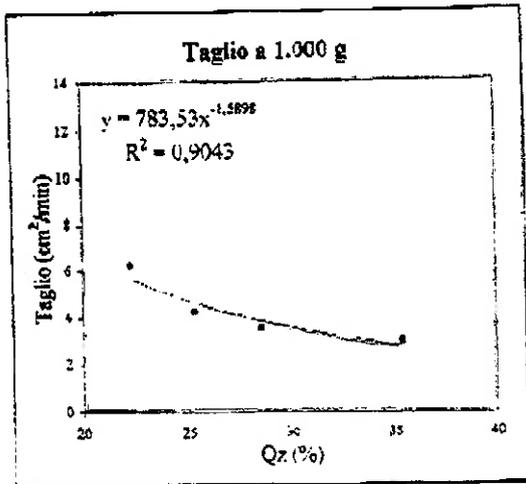


FIGURA 5.13 – CORRELACIONA A VELOCIDADE DE CORTE E O PERCENTUAL DE QUARTZO

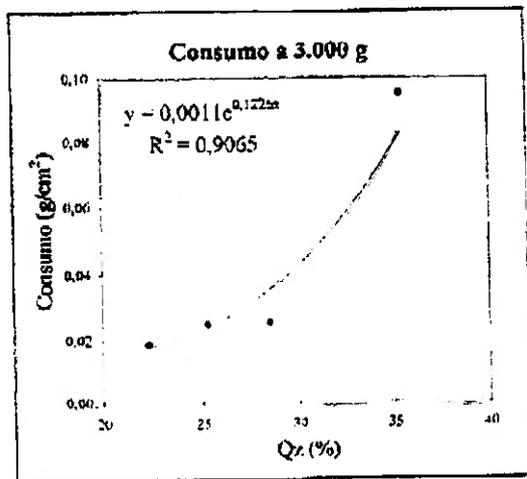
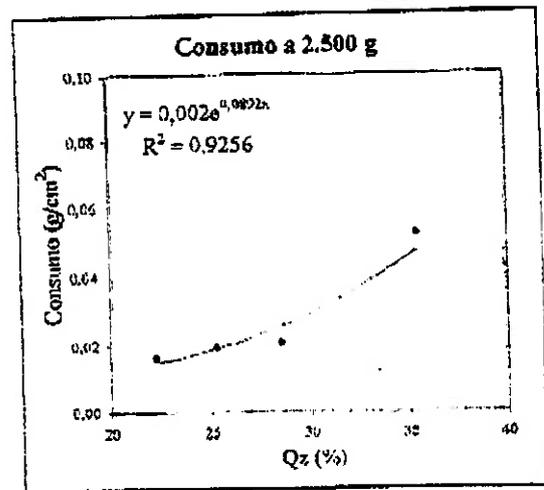
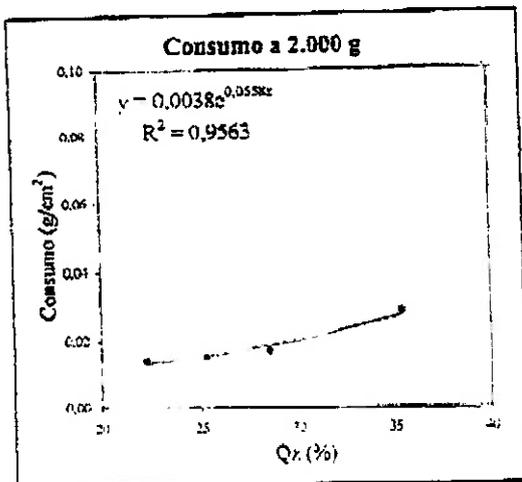
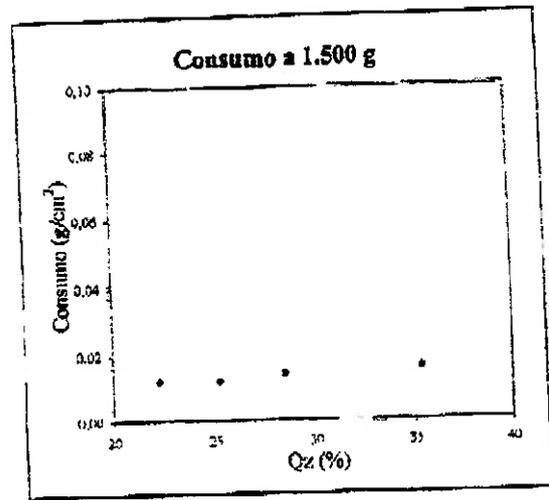
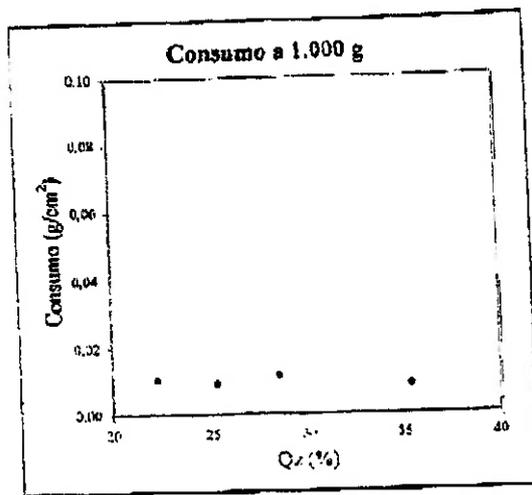


FIGURA 5.14 – CORRELACIONA O CONSUMO DA PÉROLA E O PERCENTUAL DE QUARTZO

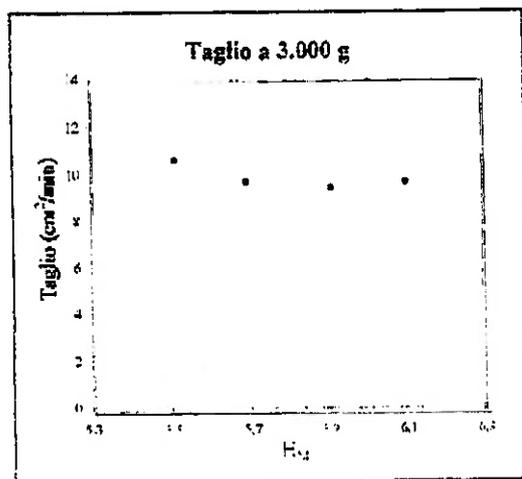
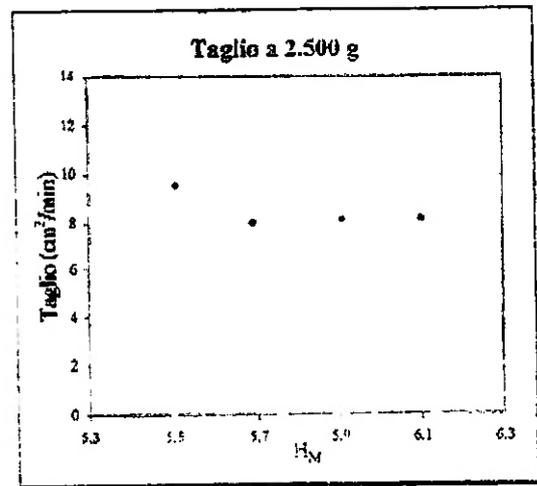
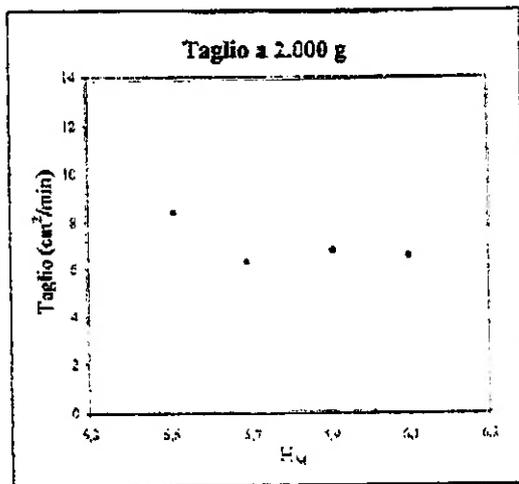
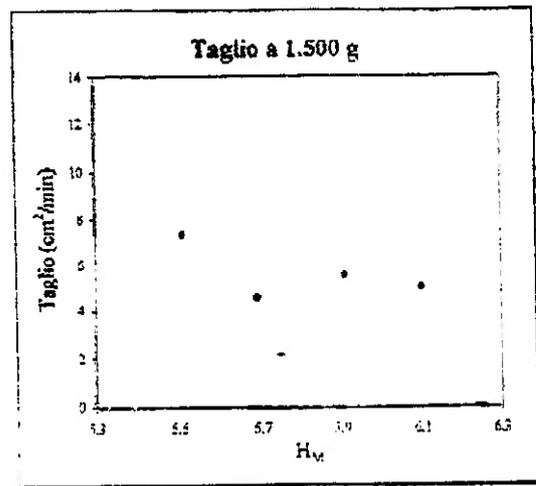
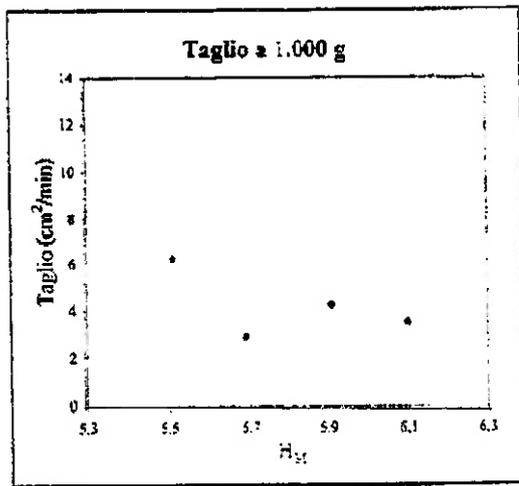


FIGURA 5.15 – CORRELAÇÃO A VELOCIDADE DE CORTE E A DUREZA MOHS MÉDIA

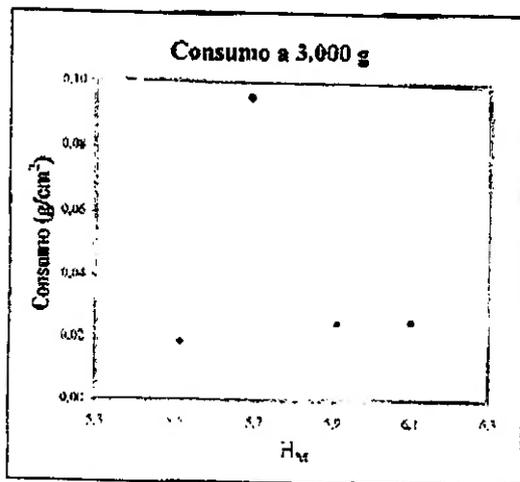
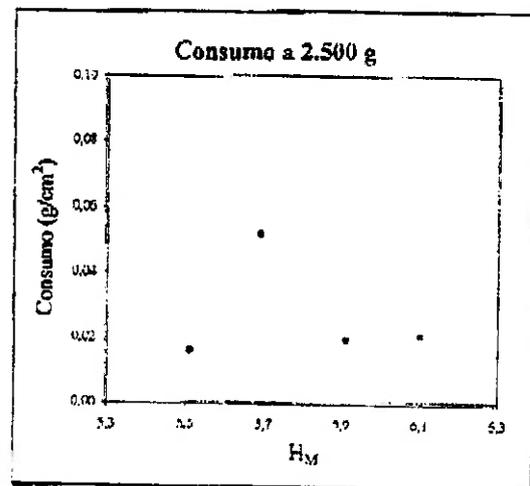
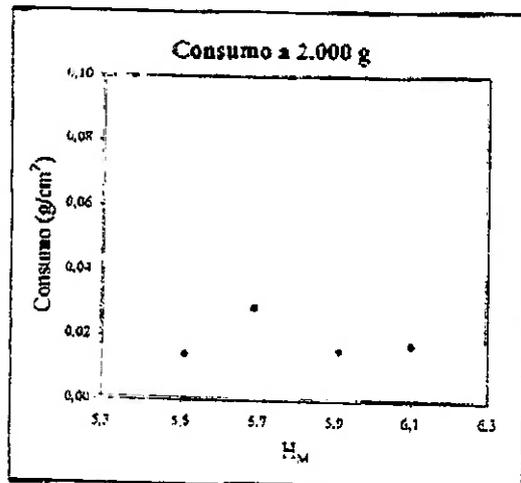
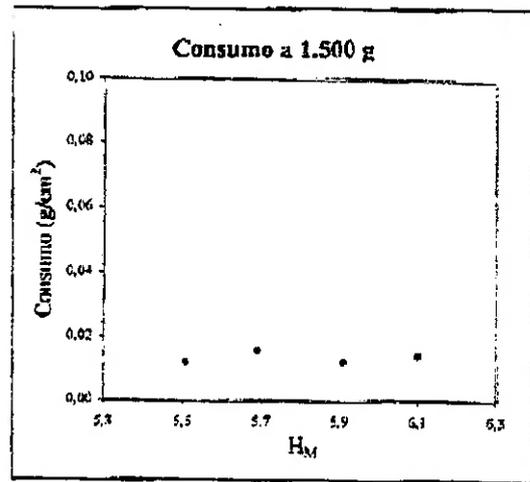
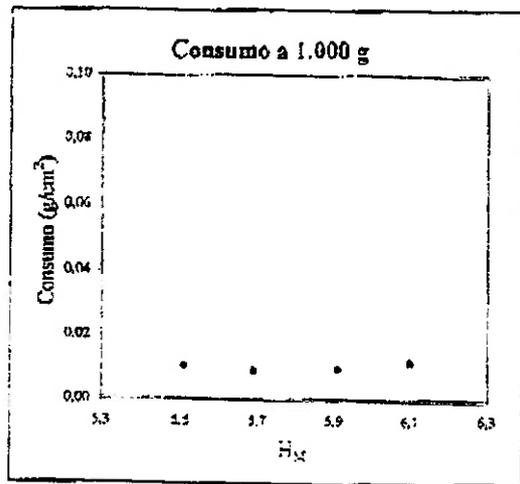


FIGURA 5.16 – CORRELAÇÃO O CONSUMO DA PÉROLA E A DUREZA MOHS MÉDIA