

CARLOS TADEU LAUAND

CORTE DE ROCHAS POR JATO D'ÁGUA ABRASIVO

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

São Paulo

2005

CARLOS TADEU LAUAND

CORTE DE ROCHAS POR JATO D'ÁGUA ABRASIVO

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. Wildor Theodoro Hennies

São Paulo

2005

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Wildor Theodoro Hennies, pela paciência, ajuda constante e incentivo permanente.

À FAPESP — Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo total financiamento do projeto.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP, especialmente ao prof. Antonio Stellin Jr., prof. Eduardo César Sansone, prof. Fernando Fujimura, prof. Lindolfo Soares, Jorge Sakamoto, Maria Cristina Martinez Bonesio, Liz Zanchetta D'Agostino.

**A Deus, por permitir que tudo isso se realizasse.**

# ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

RESUMO

*ABSTRACT*

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA .....	3
3. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	4
4. TECNOLOGIAS DE CORTE DE ROCHAS ORNAMENTAIS .....	9
4.1 PROCESSO TÉRMICO.....	19
Jato de chama .....	19
4.2 PROCESSOS MECÂNICOS .....	21
4.2.1 Por erosão .....	22
Jato d'água puro.....	23
4.2.2 Por abrasão .....	24
Fio diamantado.....	24
Fio helicoidal.....	27
Cortador a corrente e a corrente diamantada .....	31
Tear .....	33
Disco diamantado.....	39
4.2.3 Por impacto/erosão.....	42
Jato d'água abrasivo.....	43

5. SELEÇÃO DAS ROCHAS.....	51
5.1 PROCESSOS DE EXTRAÇÃO E UTILIZAÇÃO DAS ROCHAS .....	52
5.1.1 Granito Prata Interlagos .....	52
5.1.2 Granito Preto Piracaia .....	53
5.1.3 Granito Vermelho Capão Bonito.....	59
5.1.4 Mármore Branco Campos do Jordão.....	60
5.1.5 Diabásio.....	63
5.2 CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DAS ROCHAS .....	64
6. TRABALHOS EXPERIMENTAIS .....	74
6.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA.....	75
6.2 PARÂMETROS UTILIZADOS.....	76
6.3 ENSAIOS REALIZADOS .....	77
6.4 RESULTADOS .....	79
6.5 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS.....	83
7. CONCLUSÕES .....	87
REFERÊNCIAS .....	88

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Energia específica em função do tamanho nominal das partículas para diferentes métodos de fragmentação de rochas.....	5
Figura 2	Relação entre a força crítica de indentação e o conteúdo de quartzo em amostras de quartzito de três diferentes minas de ouro da África do Sul, do “Witwatersrand System” .....	7
Figura 3	Blocos de rocha ornamental no pátio da YKK Granitos, devidamente identificados, prontos para a próxima etapa do beneficiamento.....	10
Figura 4	Chapas de rocha ornamental quando retiradas do tear.....	11
Figura 5	Lousa contendo informações sobre a serrada em evolução em determinado tear.....	11
Figura 6	Politriz utilizada no beneficiamento das chapas de rochas ornamentais .....	12
Figura 7	Corte da chapa de rochas ornamental em ladrilhos através de disco diamantado. A água é utilizada para refrigeração do disco e do material .....	13
Figura 8	Pilhas de ladrilhos de pedras ornamentais cortadas através do jato d’água abrasivo .....	13
Figura 9	Ladrilhos de pedra ornamental cortados por jato d’água abrasivo. Pode-se observar o modo como estes poderão ser assentados .....	14
Figura 10	Equipe de operários executando o acabamento final dos ladrilhos de rocha ornamental na YKK.....	15
Figura 11	Ladrilhos de rocha ornamental apropriadamente embalados e prontos para o transporte.....	16
Figura 12	Esquema simplificado da produção na indústria de rochas ornamentais.....	17
Figura 13	Classificação dos processos mais utilizados para o corte de rochas ornamentais.....	18

Figura 14	Equipamento utilizado no processo de corte por jato de chama.....	20
Figura 15	Ranhura na rocha obtida com a utilização do equipamento de jato de chama.....	20
Figura 16	Esquema de equipamento de jato d'água utilizado como tecnologia de lavra de rochas ornamentais.....	23
Figura 17	Fio diamantado.....	25
Figura 18	Por meio deste fio diamantado danificado, podemos observar, além das pérolas diamantadas, o cabo de aço no interior do revestimento plástico.....	25
Figura 19	Frente de lavra do granito Preto Piracaia, cortado através do fio diamantado.....	26
Figura 20	Corte vertical com fio diamantado.....	27
Figura 21	Fio helicoidal.....	28
Figura 22	Utilização do fio helicoidal para o corte de mármore.....	28
Figura 23	Produtividade de corte em função do conteúdo de quartzo em rochas cortadas pelo fio helicoidal.....	30
Figura 24	Aspecto do mármore cortado pelo fio helicoidal.....	30
Figura 25	Cortador a corrente diamantada sobre trilhos.....	31
Figura 26	Utilização do fio diamantado para cortar o bloco antes de o mesmo entrar no tear.....	34
Figura 27	Um dos teares instalados na YKK.....	35
Figura 28	Sistema de distribuição da polpa na parte superior do tear....	36
Figura 29	Lâminas utilizadas no tear.....	36
Figura 30	Tear monofio.....	38
Figura 31	Esquema mostrando teares multifios em uma montagem sobre trilhos.....	38
Figura 32	Detalhe da utilização de um tear multifio.....	39
Figura 33	Equipamento de disco diamantado montado em laboratório no Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da EPUSP.....	40

Figura 34	Detalhe do equipamento de corte por disco diamantado. A profundidade máxima de corte é limitada pelo raio do disco.....	41
Figura 35	Os dois processos de remoção do material: impacto e rede de rompimento .....	42
Figura 36	Esquema de um cabeçote de jato d'água abrasivo .....	44
Figura 37	Vista do equipamento de corte por jato d'água instalado no Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da EPUSP .....	46
Figura 38	Unidade de pressurização de água do equipamento de corte por jato d'água abrasivo.....	47
Figura 39	Localização das pedreiras.....	51
Figura 40	Ferramentas utilizadas para a extração do granito Prata Interlagos .....	53
Figura 41	Lavra de blocos do granito Preto Piracaia .....	54
Figura 42	Frente de lavra do granito Preto Piracaia (material de granulometria mais fina) .....	55
Figura 43	Esquema de furos para preparo do corte dos grandes blocos por fio diamantado.....	56
Figura 44	Motor e mecanismo de força do fio diamantado .....	57
Figura 45	Corte obtido com explosivo no plano ortogonal do trincante.....	58
Figura 46	Bloco de granito Preto Piracaia pronto para o transporte.....	58
Figura 47	Vista geral da pedreira em Capão Bonito.....	59
Figura 48	Frente de lavra da Somibrás, em Capão Bonito.....	60
Figura 49	Vista geral da pedreira no município de Campos do Jordão ...	61
Figura 50	Blocos pequenos, utilizados para artesanato .....	62
Figura 51	Peças decorativas, no momento a principal utilização do mármore Branco Campos do Jordão .....	62
Figura 52	Vista da frente de lavra.....	63
Figura 53	Detalhe de juntas ou diaclases no dique de diabásio .....	64



Figura 54	Fotomicrografias do granito Preto Piracaia.....	68
Figura 55	Fotomicrografias do granito Prata Interlagos.....	68
Figura 56	Fotomicrografias do diabásio de Campinas.....	69
Figura 57	Fotomicrografias do granito Vermelho Capão Bonito.....	69
Figura 58	Fotomicrografias do mármore Branco Campos do Jordão.....	70
Figura 59	Formato final dos corpos-de-prova.....	75
Figura 60	Esquema mostrando o funcionamento do bocal do equipamento.....	77
Figura 61	Disposição dos corpos-de-prova para os ensaios de corte.....	77
Figura 62	Altura do corte liso ( $h_{liso}$ ) em relação à velocidade do bocal ( $v$ ) para os materiais ensaiados.....	81
Figura 63	Digitalização da face superior dos corpos-de-prova.....	82
Figura 64	Digitalização da rampa dos corpos-de-prova.....	82
Figura 65	Variação da altura do corte liso (mm) com o teor de quartzo (%) dos materiais ensaiados.....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Custos dos processos de corte utilizados como tecnologias de lavra .....	33
Tabela 2	Parâmetros técnicos dos processos de corte utilizados como tecnologias de lavra .....	33
Tabela 3	Comparação entre os equipamentos de corte de chapas e ladrilhos de rocha ornamental .....	48
Tabela 4	Características tecnológicas do granito Prata Interlagos .....	65
Tabela 5	Características tecnológicas do granito Vermelho Capão Bonito.....	65
Tabela 6	Características tecnológicas do granito Preto Piracaia .....	66
Tabela 7	Características tecnológicas do mármore Branco Campos do Jordão.....	67
Tabela 8	Metrologia dos corpos-de-prova.....	71
Tabela 9	Velocidades de propagação de onda sísmica ( $V_p$ ) nos materiais ensaiados .....	72
Tabela 10	Resultados do ensaio de resistência à compressão simples ....	73
Tabela 11	Dimensões dos corpos-de-prova em milímetros.....	75
Tabela 12	Velocidades do bocal utilizadas durante os ensaio de corte ...	79
Tabela 13	Resultados do corte do granito Preto Piracaia .....	80
Tabela 14	Resultados do corte do granito Vermelho Capão Bonito.....	80
Tabela 15	Resultados do corte do granito Prata Interlagos .....	80
Tabela 16	Resultados do corte retilíneo do mármore Branco Campos do Jordão.....	80

## LISTA DE SÍMBOLOS

$b_B$	largura na face inferior do corte
$b_T$	largura no topo do corte
$D$	diâmetro do disco
$d_0$	diâmetro do orifício da jóia
$d_F$	diâmetro do bocal
$h$	profundidade de corte total
$h_{liso}$	altura do corte liso
$\dot{m}_A$	fluxo de massa de abrasivo
$p$	pressão hidráulica
$v$	velocidade do bocal
$v_d$	velocidade na periferia do disco
$V_p$	velocidade de propagação de onda sísmica
$x$	altura do bocal
$\sigma_c$	resistência à compressão
$\omega$	velocidade angular do disco
$\varphi$	ângulo de impacto

## RESUMO

O presente estudo apresenta uma classificação das diversas tecnologias utilizadas para o corte de rochas ornamentais, situando as tecnologias de corte por jato d'água e por jato d'água abrasivo nesta classificação. Estabelece uma relação entre as características tecnológicas e a composição mineralógica das rochas experimentadas com a máxima profundidade de corte obtida com diferentes velocidades de deslocamento do bocal no processo de corte por jato d'água abrasivo. Para isso, foram selecionadas algumas rochas ornamentais, como os granitos Prata Interlagos, Vermelho Capão Bonito e Preto Piracaia, o mármore Branco Campos do Jordão e uma rocha "não ornamental", o diabásio. Foram executados diversos ensaios para determinação de suas características e composições. Para determinação da máxima profundidade de corte, as rochas foram ensaiadas no equipamento de corte por jato d'água abrasivo do Laboratório de Mecânica de Rochas do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da EPUSP (Escola Politécnica da Universidade de São Paulo).

## **ABSTRACT**

*This study presents a classification of the various technologies used to cut dimension stones and attempts to place technologies of water jet cutting and abrasive water jet in this classification. The intention is to establish a relationship between the technological characteristics as well as the mineral composition of the stones that have been tested and the maximum depth of cut obtained with different traverse rates in the abrasive water jet cutting process. For this purpose, several dimension stones were selected, such as Prata Interlagos granite, Vermelho Capão Bonito granite and Preto Piracaia granite, as well as Branco Campos do Jordão marble and a "non-dimension" stone, the diabase. Several tests were conducted to determine their characteristics and composition. To determine the maximum depth of cut, these rocks were tested with the abrasive water jet cutting equipment available at the Rock Mechanics Laboratory in the Department of Mines and Petroleum Engineering at EPUSP.*

## 1. INTRODUÇÃO

A tecnologia de corte por jato d'água já é uma realidade em diversas áreas da Engenharia onde se faz necessária uma ferramenta de corte precisa, automatizada e versátil. Na indústria aeronáutica, por exemplo, substitui o *laser* no corte de chapas de titânio, com a vantagem de não elevar a temperatura do metal durante o processo. Na indústria automobilística é largamente utilizada para o corte de painéis de plástico. No setor de rochas ornamentais, o equipamento pode ser utilizado tanto para o corte de chapas ou ladrilhos, como para o corte de blocos em pedreiras, como tecnologia de lavra.

O presente estudo procura mostrar a relação existente entre o desempenho do processo de corte de rochas por jato d'água abrasivo e as características tecnológicas e composição mineralógica da rocha, notadamente o teor de minerais de alta dureza na escala Mohs, como o quartzo. Neste sentido, o Capítulo 3 apresenta aspectos básicos da teoria que envolve a fragmentação de rochas, apresentando dados que mostram a influência do teor de quartzo da rocha na quantidade de energia necessária para fragmentá-la.

O Capítulo 4 situa a tecnologia de corte por jato d'água e por jato d'água abrasivo na indústria de rochas ornamentais, apresentando uma breve descrição das tecnologias de corte utilizadas durante as diversas fases do processamento do material. Apresenta, inclusive, uma classificação que situa cada tecnologia de acordo com o processo utilizado para o corte de rochas ornamentais. Por fim, compara as tecnologias de disco diamantado e jato d'água abrasivo, utilizadas para o corte de chapas e ladrilhos de rocha ornamental.

O Capítulo 5 apresenta as características das rochas ensaiadas no equipamento de corte por jato d'água abrasivo, descrevendo a sua utilização, a tecnologia de lavra utilizada para a extração, algumas

características tecnológicas, como a resistência à compressão e a velocidade de propagação de onda sísmica, e, finalmente, a composição mineralógica.

O Capítulo 6 descreve os ensaios realizados no equipamento de corte por jato d'água abrasivo do Laboratório de Mecânica de Rochas do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da EPUSP. Para cada corpo-de-prova, serão realizados ensaios retilíneos em diferentes velocidades de bocal. Desta maneira, poder-se-á determinar a variação da profundidade de corte com relação à velocidade do bocal para cada rocha ensaiada e, simultaneamente, determinar a variação da profundidade de corte com relação às características de cada rocha. Estas relações serão discutidas e, no Capítulo 7, serão apresentadas as conseqüentes conclusões do trabalho.

## 2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

O objetivo principal do estudo é mostrar a relação existente entre as características tecnológicas das rochas experimentadas e a máxima profundidade de corte que pode ser obtida com diferentes velocidades de deslocamento do bocal no processo de corte por jato d'água abrasivo. Através do estudo destas relações, pode ser possível predeterminar a produtividade de corte para outras rochas que apresentem características similares.

Além disso, procura-se classificar e comparar a tecnologia de corte por jato d'água com as tecnologias mais utilizadas para o corte de rochas ornamentais, da lavra até o corte das chapas e ladrilhos.

Por ser uma tecnologia relativamente recente e com imensa potencialidade de aplicação no setor de rochas ornamentais, o estudo se justifica plenamente.



### 3. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As rochas são o material de engenharia objeto de estudo do engenheiro de minas em ciências como a Mecânica de Rochas.

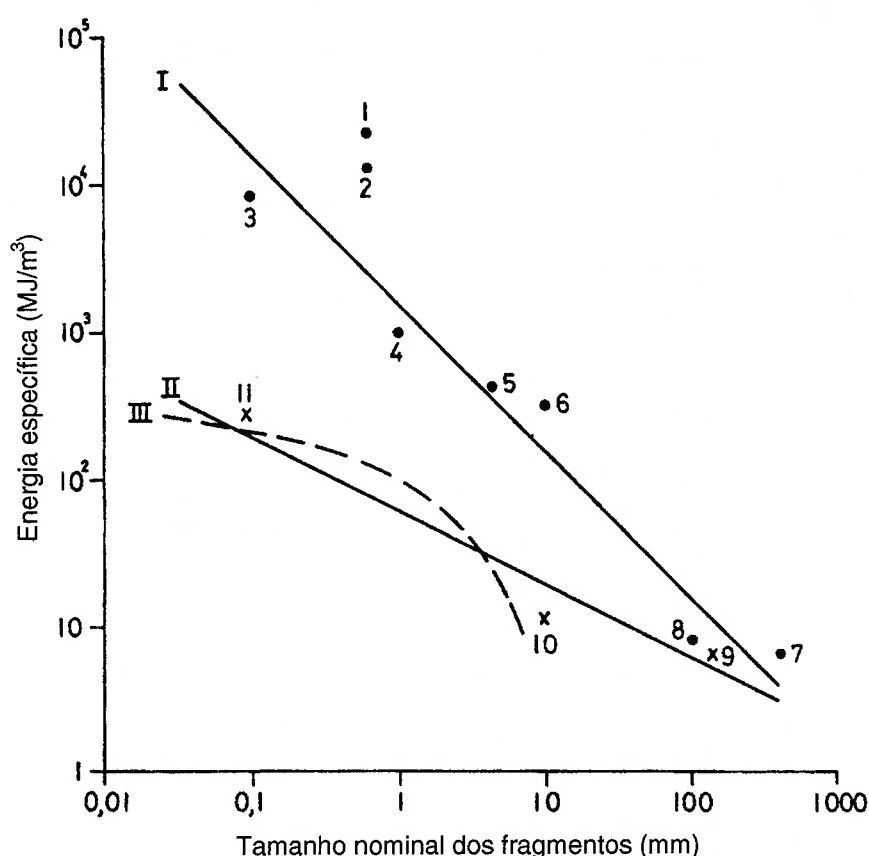
Na Escola Politécnica da USP, o Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo segue, em princípio, o pensamento do saudoso Professor Paulo Abib Andery, que considerava no âmbito do tratamento de minerais as teorias da cominuição, o que pode ser aplicado também para a lavra de minas. As teorias de Kick, de Rittinger e de Bond são largamente aplicadas dentro da visão do engenheiro mineral ou de tratamento de minerais mais especificamente. Neste sentido, JAEGER; COOK (1984), ao analisarem a fragmentação das rochas, citam que a mesma é uma importante parte da maioria das operações de mineração envolvendo a mecânica das rochas. Os autores chamam a atenção de que é conveniente distinguir entre escavação de rochas, na qual diferentes métodos de fragmentação são usados para remover a rocha do maciço rochoso e cominuição, na qual a rocha que foi escavada é reduzida em tamanho de suas partículas.

Von Rittinger, em 1867, postulou que a energia consumida na fragmentação era diretamente proporcional à área das novas superfícies produzidas. O grau de fragmentação que caracteriza o processo de redução de tamanho é, segundo Rittinger, diretamente proporcional ao trabalho despendido na operação (RESENDE SILVA, 1994). Já a teoria proposta por Kick, em 1885, conhecida como teoria do volume, considera que a energia consumida na fragmentação é diretamente proporcional à redução de volume das partículas. Tanto Rittinger como Kick admitiam que a fragmentação tinha lugar sobre um conjunto de partículas todas iguais, que produziam um outro conjunto de partículas também iguais, mas de menor tamanho [MARANHÃO (1981) *apud* RESENDE SILVA (1994)]. Na realidade, como as distribuições das dimensões inicial e final das partículas

são variadas, são introduzidos fatores de erro que tornam pouco rigorosas essas teorias.

Bond, em 1952, considerou que a energia de fragmentação aplicada a um determinado volume de material sólido é inversamente proporcional à raiz quadrada do tamanho das partículas resultantes e diretamente proporcional ao comprimento das fendas formadas no material e à raiz quadrada da superfície da nova área gerada [BOND (1959) *apud* RESENDE SILVA (1994)]. A aplicabilidade da teoria de Bond tem sido comprovada.

Após discutir as teorias acima, JAEGER; COOK (1976) apresentam um diagrama da energia específica empregada em muitos procedimentos em função do tamanho do fragmento nominal obtido por cada processo tecnológico usado (Figura 1).



**Figura 1** — Energia específica em função do tamanho nominal das partículas para diferentes métodos de fragmentação de rochas [JAEGER; COOK (1976)].

No gráfico da Figura 1 são apresentados os pontos relativos a:

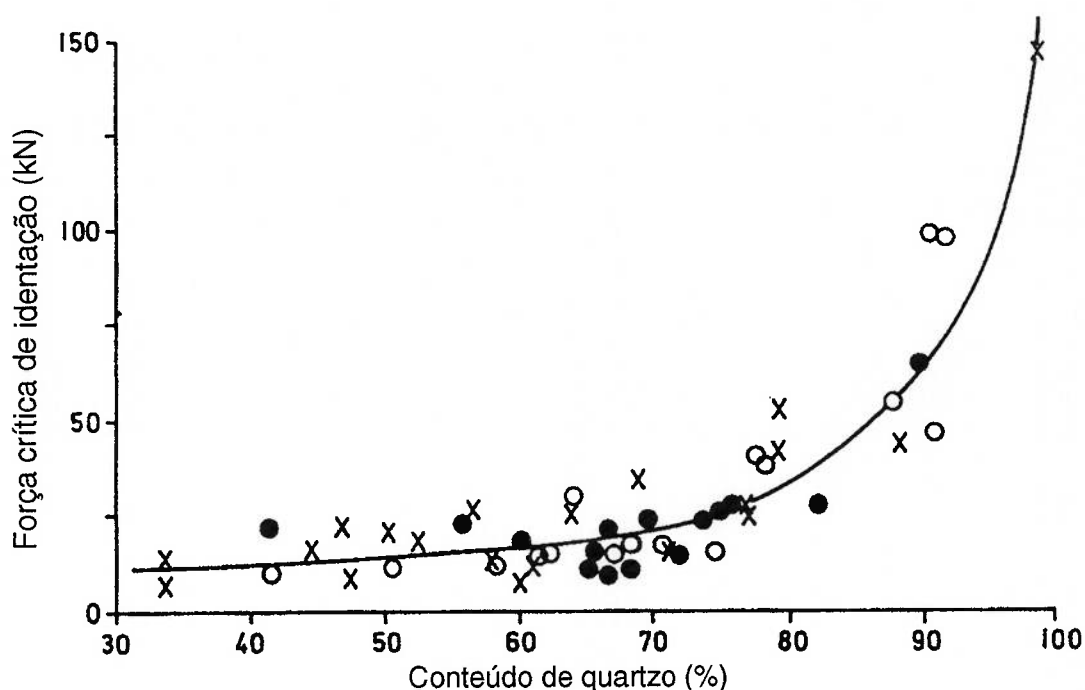
1. Jato de chama
2. Erosão por jato d'água
3. Corte com ferramenta diamantada
4. Sondagem percussiva
5. Sondagem tricônica
6. Corte com brocas rotativas
7. Cunha de impacto
8. Desmonte por explosivos
9. Britador de mandíbula
10. Britador giratório
11. Moagem

São apresentadas, ainda, as três curvas referentes às hipóteses de Rittinger (I), válida para as operações de escavação de rochas (1 a 8), de Bond (II) para os procedimentos de tratamento de minerais (9 a 11) e de Kick (III).

É interessante observar os pontos 1, 2 e 3, que correspondem, respectivamente, aos processos de fragmentação de rochas por jato de chama, por jato d'água e por ferramenta diamantada (disco e fio diamantados). O ponto 1, correspondente ao processo de corte por jato de chama, requer a maior quantidade de energia para fragmentar, ou cortar, a rocha. O ponto 2, correspondente ao processo de corte por jato d'água (puro, neste caso), requer menos energia específica para fragmentar a rocha até obter fragmentos de mesmo tamanho (1 mm, aproximadamente). O ponto 3, correspondente ao processo de corte por ferramentas diamantadas, requer menos energia específica para a obtenção de fragmentos dez vezes menores (0,1 mm).

JAEGER; COOK (1976) apresentaram, também, um gráfico, reproduzido na Figura 2, referente à relação entre o conteúdo de quartzo existente em rochas de mineralizações auríferas da África do Sul e sua força

crítica de indentação. Na curva resultante, nota-se claramente que a proporção de quartzo presente nas rochas tem uma variação exponencial com a força crítica de indentação por semi-esfera em três diferentes minas de ouro.



**Figura 2** — Relação entre a força crítica de indentação e o conteúdo de quartzo em amostras de quartzito de três diferentes minas de ouro da África do Sul, do “Witwatersrand System”, representadas por “X”, círculo preenchido e círculo vazado [JAEGER; COOK (1976)].

Fica claro, observando o gráfico da Figura 2, que a força, ou a energia, necessária para fragmentar a rocha aumenta exponencialmente com relação ao conteúdo de quartzo desta rocha.

Sendo o quartzo um mineral de grande dureza na escala Mohs, é de se esperar que o seu conteúdo em uma determinada rocha tenha grande influência no desempenho dos processos de fragmentação. DEKETH (1995) mostra, inclusive, que as ferramentas utilizadas para o corte de rochas sofrem maior desgaste quando utilizadas em rochas de alto teor de quartzo. ROTONDARO (1989) mostrou que o desgaste das mandíbulas do britador, assim como a energia requerida no processo de britagem, aumentam de

acordo com o teor de quartzo da rocha a ser processada. Em se tratando de processos de corte de rochas ornamentais, a relação entre o teor de quartzo da rocha e a produtividade de corte também é importante. FUJIMURA; STELLIN JÚNIOR (2001), estudando o processo de corte de rochas por fio helicoidal, salientam a importância do teor de quartzo da rocha, tanto no desempenho do processo como no desgaste do fio.

No presente trabalho será investigada a influência do teor de quartzo, além de outras características das rochas, no desempenho do processo de corte por jato d'água abrasivo.

O Capítulo 4, a seguir, apresentará as tecnologias mais utilizadas para o corte de rochas ornamentais, destacando a influência das características das rochas no desempenho dos processos.

#### 4. TECNOLOGIAS DE CORTE DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Antes de dissertarmos sobre as diversas tecnologias utilizadas para o corte das rochas ornamentais, é interessante apresentarmos, de maneira resumida, as etapas e os processos envolvidos na produção das mesmas.

Podemos identificar três etapas distintas no processo de produção de rochas ornamentais: extração, beneficiamento primário e beneficiamento final.

Segundo ALENCAR *et al.* (1996), a extração consiste na remoção do material dos maciços rochosos ou dos matacões. O produto desta etapa do processo é o bloco de rocha ornamental, retangular, de dimensões adequadas às outras etapas do processamento. A Figura 3 ilustra esses blocos no pátio da YKK do Brasil Ltda, empresa localizada no município de Arujá, estado de São Paulo, especializada no beneficiamento de rochas ornamentais.

Várias tecnologias podem ser utilizadas para obter o bloco do matacão ou do maciço rochoso. CICCUI; CARANASSIOS *apud* VIDAL; STELLIN JÚNIOR (1999) dividiram as tecnologias de lavra em dois grupos principais: tecnologias cíclicas e tecnologias de corte contínuo, incluindo aí as tecnologias avançadas. As tecnologias cíclicas são aquelas em que os cortes necessários para isolar um volume de rocha são realizados através da sucessão de diversas operações que vão constituir as fases de um ciclo. Um processo que representa muito bem este grupo é a perfuração seguida por desmonte para destaque do bloco. Segundo os mesmos autores, as tecnologias de corte contínuo são, basicamente, aquelas cujas operações são efetuadas sem o uso predominante da perfuração e explosivo, como a tecnologia de corte por jato de chama, por fio helicoidal, a corrente, por fio diamantado e por jato d'água.



**Figura 3** — Blocos de rocha ornamental no pátio da YKK Granitos, devidamente identificados, prontos para a próxima etapa do beneficiamento.

A próxima etapa do processo de produção de rochas ornamentais é chamada beneficiamento primário, que consiste no desdobramento ou serragem dos blocos. Nesta etapa utiliza-se um equipamento denominado tear de lâminas, onde o processo de corte se dá pela ação de um elemento abrasivo conduzido pelo conjunto de lâminas de aço movimentadas pelo tear (STELLIN JÚNIOR, 1998). Deste modo, o bloco é cortado em chapas de largura e comprimento idênticos às do bloco, com espessuras usuais que variam de 10 a 30 mm. A Figura 4 mostra estas chapas aguardando a próxima etapa do beneficiamento, no pátio da YKK. É importante manter um registro preciso com todas as informações relevantes referentes à serrada (termo usual na indústria para se referir ao processo de corte pelo tear de lâminas) dos blocos. Na Figura 5 podemos observar estas anotações em uma lousa localizada próximo ao tear: número da serrada; horário de início da serrada; identificação do bloco, em que a sigla identifica a origem deste bloco (informação esta previamente escrita à tinta no próprio bloco, como pode ser observado na Figura 3).





**Figura 4** — Chapas de rocha ornamental quando retiradas do tear.



**Figura 5** — Lousa contendo informações sobre a serrada em evolução em determinado tear.



A etapa seguinte é denominada beneficiamento final, compreendendo o polimento das chapas, corte em ladrilhos e acabamento final. O polimento consiste na aplicação de abrasivos de granulometria decrescente, e é realizado através de grandes politrizes, capazes de polir até três chapas simultaneamente, como a ilustrada na Figura 6.



**Figura 6** — Politriz utilizada no beneficiamento das chapas de rochas ornamentais.

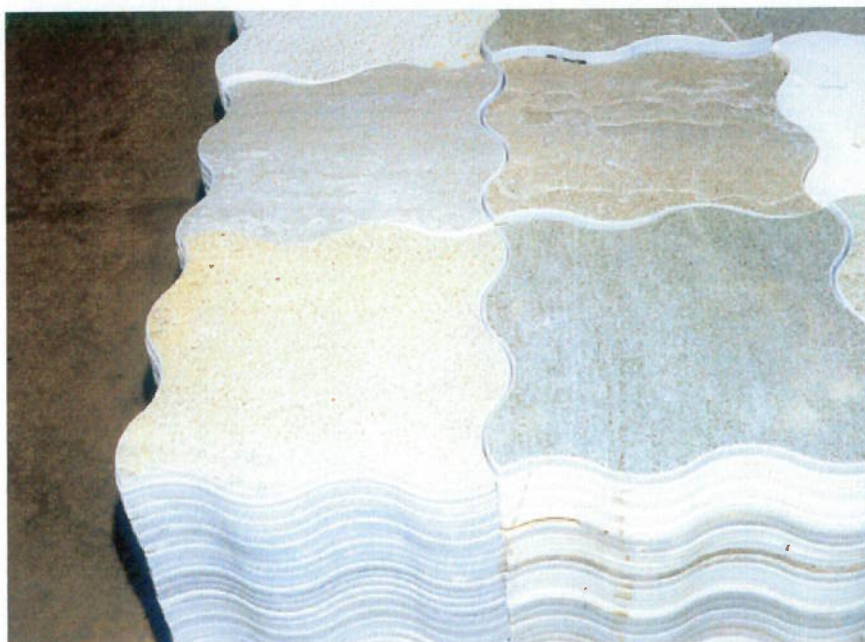
Depois de polidas, as chapas deverão ser cortadas em ladrilhos. Para tanto, podem ser utilizados discos diamantados (Figura 7) ou jatos d'água, abrasivos ou não. A vantagem da utilização do jato d'água abrasivo para o corte das chapas é a possibilidade de obtenção de ladrilhos de formatos variados, às vezes de geometria complexa, impossíveis de se obter através do corte por disco diamantado. As Figuras 8 e 9 mostram ladrilhos de pedra ornamental cortados através da tecnologia de jato d'água abrasivo na Metalúrgica Ican, empresa localizada em São Carlos, estado de São Paulo.



**Figura 7** — Corte da chapa de rochas ornamental em ladrilhos através de disco diamantado. A água é utilizada para refrigeração do disco e do material.



**Figura 8** — Pilhas de ladrilhos de pedras ornamentais cortadas através do jato d'água abrasivo.



**Figura 9** — Ladrilhos de pedra ornamental cortados por jato d'água abrasivo. Pode-se observar o modo como estes poderão ser assentados.

A última etapa do beneficiamento final é o acabamento dos ladrilhos, que consiste em correções de imperfeições nas bordas e furação, se necessário. É o acabamento das bordas que confere o perfil e a regularidade das extremidades das faces visíveis da peça (ALENCAR *et al.*, 1996). Para a execução desses serviços são utilizados, geralmente, equipamentos simples e portáteis, como lixadeiras, discos diamantados ou rebolos abrasivos (Figura 10).





**Figura 10** — Equipe de operários executando o acabamento final dos ladrilhos de rocha ornamental na YKK.

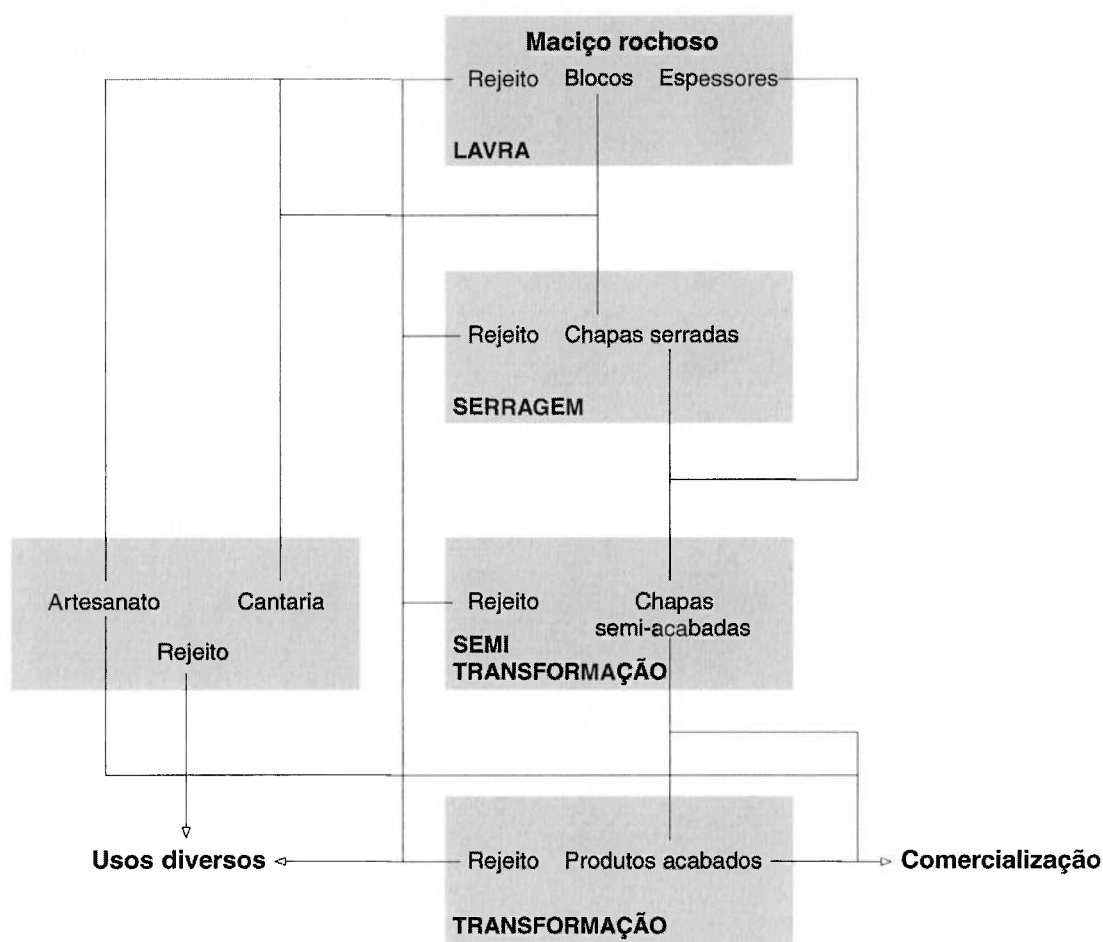
Após esta etapa, os ladrilhos e outras peças de rocha ornamental serão apropriadamente embalados (Figura 11) e estarão prontos para utilização na construção civil, onde serão usados, geralmente, como revestimento de paredes, como piso, ou como pias para cozinhas ou lavatórios.



**Figura 11** — Ladrilhos de rocha ornamental apropriadamente embalados e prontos para o transporte.

MELLO MENDES (1974) *apud* STELLIN (2003) apresentou um quadro simplificado das operações executadas pela indústria de rochas ornamentais, o qual está reproduzido na Figura 12.

Neste quadro observamos que o autor dividiu a etapa de beneficiamento final em semi-transformação e transformação. A semi-transformação consiste no polimento das chapas; já a etapa de transformação consiste no corte das chapas e acabamento final. Podemos notar que, durante as operações de lavra, são gerados blocos e espessores (chapas de grande espessura). Nota-se, também, que em todas as etapas são produzidos rejeitos, os quais podem ser aproveitados. Neste sentido, FUJIMURA *et al.* (1996) fornecem informações para o aproveitamento de finos de pedreiras de granito como agregado na fabricação de concreto compactado a rolo (CCR). PISSATO; SOARES (2001) tratam da utilização de finos de pedreiras como elemento constituinte na mistura de solo-cimento para correção granulométrica de solo argiloso, com o objetivo de melhorar suas características físicas, além de oferecer uma alternativa para a destinação desses rejeitos da mineração.

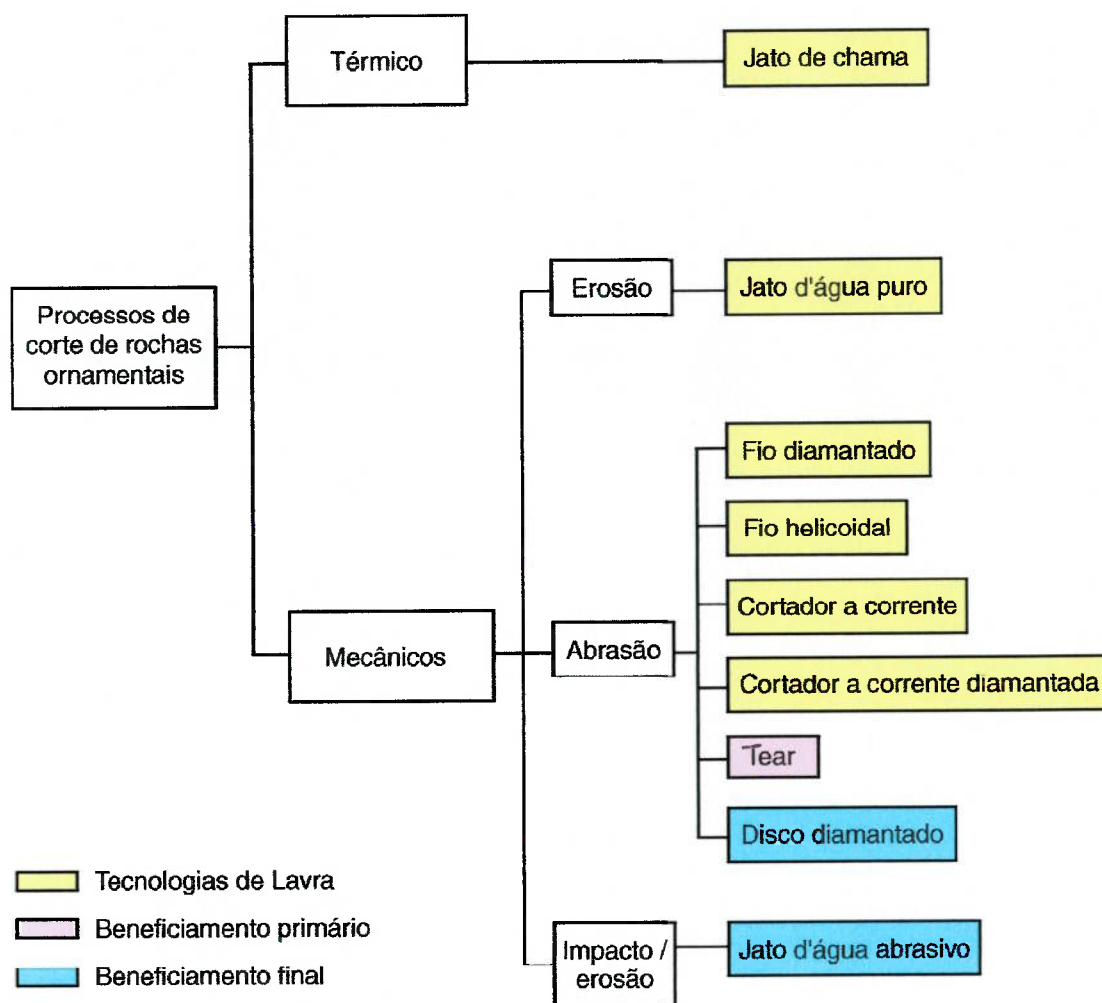


**Figura 12** — Esquema simplificado da produção na indústria de rochas ornamentais [MELLO MENDES (1974) *apud* STELLIN (2003)].

Depois desta breve descrição do processo de produção das rochas ornamentais, passemos agora a uma classificação das diversas tecnologias de corte utilizadas durante as várias etapas deste processo.

MAURER (1968) propôs uma distinção entre os vários mecanismos aplicados nos processos de perfuração e escavação de rochas. Afirma que a rocha pode se fragmentar através de quatro mecanismos distintos: tensões termicamente ou mecanicamente induzidas, fusão/vaporização e, ainda, através de reações químicas. Esta distinção, com exceção dos processos de fragmentação por meio de fusão/vaporização e reações químicas, pode ser aplicada aos diferentes processos de corte de rochas utilizados hoje em dia, especialmente no que diz respeito aos métodos utilizados para o corte de rochas ornamentais, incluindo aí as tecnologias de lavra, o beneficiamento

primário e os processos utilizados para o corte das chapas ou dos ladrilhos previamente polidos. Propõe-se, aqui, uma classificação das tecnologias mais utilizadas para o corte de rochas ornamentais, como apresentado na Figura 13.



**Figura 13** — Classificação dos processos mais utilizados para o corte de rochas ornamentais.

A partir desta classificação, será apresentada, a seguir, de maneira resumida, uma explanação de cada um dos processos mais utilizados para o corte de rochas ornamentais.

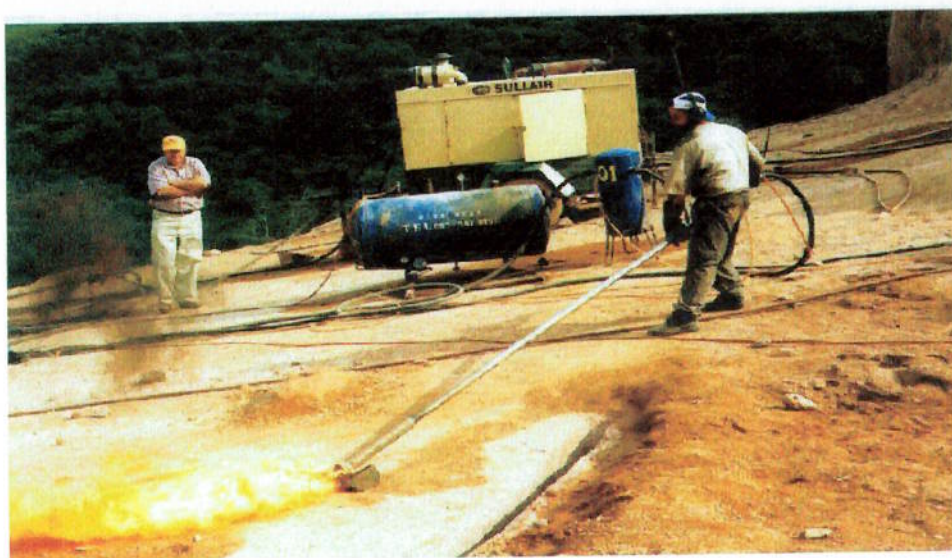
#### 4.1 PROCESSO TÉRMICO

O processo de corte de rochas ornamentais por meios térmicos se fundamenta no fato de o calor criar uma expansão de volume de valor diferente nos vários cristais e grãos constituintes da rocha, notadamente o quartzo, que apresenta uma expansão volumétrica de 0,82% quando submetido a uma temperatura de 573 °C (MAURER, 1968). Como podemos observar na classificação da Figura 13, o jato de chama é a única tecnologia de corte de rochas ornamentais que se beneficia deste fenômeno. POU *et al.* (2003) estudaram a aplicação do raio *laser* para o tratamento térmico da superfície de diversos granitos. Desconhece-se, até o presente momento, alguma tecnologia de corte de rochas baseada no *laser*.

##### *Jato de chama*

Trata-se de uma técnica utilizada para lavrar blocos de rocha ornamental. O equipamento consiste de uma câmara de combustão revestida de material refratário, na qual são inseridos o combustível (óleo diesel, armazenado em um tanque) e o comburente (ar ou oxigênio, pressurizado por meio de um compressor de ar e mantido sob pressão em um tanque), como ilustrado na Figura 14. A mistura ar/combustível, inflamada, sai por um tubo de cerca de 2,5 m de comprimento e atinge a superfície da rocha, criando um canal com largura de 5 a 10 cm (Figura 15).





**Figura 14** — Equipamento utilizado no processo de corte por jato de chama.



**Figura 15** — Ranhura na rocha obtida com a utilização do equipamento de jato de chama.

A produtividade de corte, ou seja, a superfície cortada em um determinado espaço de tempo é de, aproximadamente,  $1 \text{ m}^2/\text{h}$ , segundo CICCUI; MANCA (1994); já HENNIES *et al.* (1999) afirmam que, em se

tratando do granito Vermelho Capão Bonito, e com o equipamento utilizado na pedreira Somibrás (visitada pelos autores), a produtividade é de cerca de 2 m<sup>2</sup>/h. A perda de material, ou seja, o volume de material fragmentado com relação à superfície cortada, é de 0,175 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> (CICCU; MANCA, 1994). Estes mesmos autores afirmam que o custo total de operação do equipamento é de, aproximadamente, US\$ 57,19 / m<sup>2</sup>, incluindo aí a depreciação do equipamento (US\$ 6,25 / m<sup>2</sup>), peças de reposição (US\$ 1,88 / m<sup>2</sup>), mão-de-obra (operação do equipamento na Itália, US\$ 15,31 / m<sup>2</sup>) e, o maior custo da composição, o combustível, US\$ 33,75 / m<sup>2</sup> (valores de 1994).

Por ser um processo de corte de rocha por meio térmico, a desagregação é obtida devido à expansão volumétrica diferencial do quartzo. Sua eficiência, portanto, está limitada a rochas que contém quartzo, como granitos e gnaisses. Não foram encontrados dados sobre a influência do teor de quartzo no desempenho do corte por jato de chama.

HENNIES *et al.* (1999) informam, ainda, que o processo é muito ruidoso, devido à alta velocidade de saída dos gases combustíveis no bocal do jato de chama.

#### 4.2 PROCESSOS MECÂNICOS

Os processos mecânicos mais utilizados para o corte de rochas ornamentais podem ser classificados da seguinte maneira, como indicado na Figura 13: por erosão, por abrasão e por impacto/erosão.

#### 4.2.1 Por erosão

Os processos mecânicos de corte por erosão utilizam jato d'água puro, ou seja, sem abrasivo, de alta ou ultra-alta pressão\*, alta velocidade e alto fluxo de água, dirigido contra a superfície do material a ser cortado. Variações do jato d'água puro compreendem os jatos de cavitação e os jatos pulsantes.

O jato d'água de cavitação tira proveito do efeito destruidor do processo de cavitação. KALUMUCK *et al.* (1993) apresentam noções sobre os mecanismos que regem os jatos submersos e o efeito destruidor da cavitação. Utilizações para os jatos d'água de cavitação podem ser encontradas em vários setores. Na área da mineração, além do corte de rochas, pode ser utilizado para perfuração de rochas [BARDIN; CHOLET (1988) *apud* VIJAY *et al.* (1993)] e para a fragmentação de carvão [CONN; RUDY (1976) *apud* VIJAY *et al.* (1993)]. Aliás, RADJIKO (1995) apresenta o modelamento e os mecanismos que atuam no processo de fragmentação do carvão na frente de lavra com a utilização do jato d'água puro.

O jato d'água pulsante é composto de vários pulsos seqüenciais de alta velocidade. Quando estes pulsos impactam o material alvo, as pressões nos pontos de impacto estão altamente localizadas. A fadiga provocada por estas pressões rompe o material com uma velocidade maior, se compararmos com o processo de jato contínuo. VIJAY (1999) descreve pormenorizadamente este tipo de jato e os vários métodos utilizados para gerar os pulsos.

O processo mecânico por erosão mais utilizado para o corte de rochas ornamentais é o jato d'água puro, descrito a seguir.

---

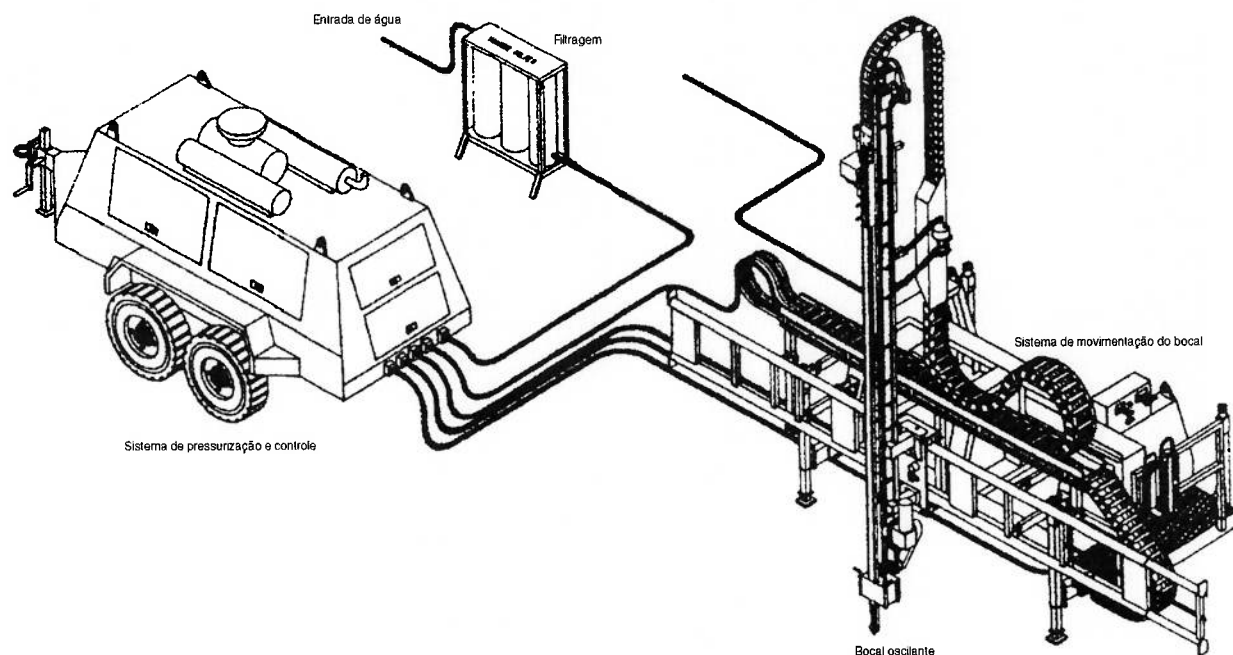
\* MOMBER (1998) apresenta, conforme a *Water Jet Technology Association* (Associação de Tecnologia de Jato d'Água), de St. Louis, EUA, a seguinte classificação para os jatos d'água: *Pressurizados*. Utilizados para corte, limpeza ou remoção de materiais indesejados em diversas superfícies, com ou sem a adição de partículas sólidas (abrasivo). A pressão da bomba é inferior a 34 MPa.

*Alta pressão*. Jatos d'água ditos de alta pressão, com ou sem líquidos ou partículas sólidas, são utilizados para corte, limpeza ou remoção de materiais indesejados em diversas superfícies. A pressão da bomba está compreendida entre 34 e 200 MPa.

*Ultra-alta pressão*. Com as mesmas utilizações do anterior, mas com pressões superiores a 200 MPa.

### *Jato d'água puro*

O processo de corte por jato d'água puro pode ser utilizado como tecnologia de lavra para o corte de blocos em pedreiras. O esquema da Figura 16 mostra um equipamento completo de corte por jato d'água para utilização em lavra de rochas ornamentais.



**Figura 16** — Esquema de equipamento de jato d'água utilizado como tecnologia de lavra de rochas ornamentais (WYATT; PETERSON, 1997).

A água, depois de filtrada, é pressurizada a 276 MPa por meio de uma bomba alimentada por um motor diesel de 150 kW. Após a pressurização, é enviada, por meio de tubulações especiais de alta pressão, para o bocal oscilante, localizado em um sistema de transporte. Este bocal é chamado oscilante pois é movimentado em dois sentidos: ao longo do corte e transversalmente ao mesmo. Este movimento transversal, chamado de oscilação do bocal, é necessário para que se possa abrir uma ranhura de pelo menos 5 cm na rocha, pois o bocal, à medida que a ranhura se aprofunda, “penetra” na mesma, de maneira a permitir o aprofundamento do corte. Assim, após percorrer o comprimento de corte desejado, o bocal

abaixa e retorna até o ponto inicial. O ciclo se repete até que se atinja a profundidade desejada.

Equipamentos que utilizam este processo são capazes de abrir uma ranhura de 5 a 7,5 cm em granito (WYATT; PETERSON, 1997), com uma profundidade de 6,1 m. CICCUI; MANCA (1994) afirmam que a produtividade de corte é de 2 m<sup>2</sup>/h e a perda de material é de 0,03 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>. O custo de operação, segundo os mesmos autores, chega a US\$ 27,50 / m<sup>2</sup> de material cortado, considerando que a bomba seja movida por um motor elétrico (valores de 1994). Como o custo do equipamento é alto (e este é um fator que impede, ainda, a sua utilização em grande escala) o custo total de operação, incluindo a depreciação do equipamento, é de US\$ 46,25 / m<sup>2</sup>.

Até o presente momento, não se conhece pedra no Brasil que utilize esta tecnologia de corte.

#### **4.2.2 Por abrasão**

Processos de corte de rocha por abrasão utilizam, como o próprio nome informa, abrasivos de alta dureza, como diamante, carbeto de tungstênio ou óxido de alumínio para desgastar a rocha, abrindo, desta maneira, um sulco na mesma. Este processo de corte é utilizado como tecnologia de lavra (fio diamantado, fio helicoidal, cortadores a corrente), como beneficiamento primário (teares) e também como beneficiamento final, para o corte de chapas (disco diamantado).

##### *Fio diamantado*

Esta tecnologia, utilizada para o corte de blocos na frente de lavra, consiste na utilização de um cabo de aço especial, no qual se fixam “pérolas” diamantadas, intercaladas por elementos separadores elásticos (Figura 17). As pérolas são constituídas de uma pasta diamantada montada sobre um suporte cilíndrico, formando um anel de pérolas. O diâmetro externo do anel diminui durante a operação de corte. A pasta diamantada é constituída de um ligante ou matriz metálica que engloba na sua



composição partículas pontiagudas de diamante sintético (ALENCAR *et al.*, 1996).



**Figura 17** — Fio diamantado.

As pérolas podem ser fabricadas por dois métodos: eletrodeposição e sinterização. As pérolas eletrodepositadas sofrem um banho galvânico com um componente de sal de níquel e diamante sintético como eletrólito. A sinterização consiste em homogeneizar o metal com o diamante sintético, através de altas pressões e temperaturas. O fio de pérolas sinterizadas apresenta a vantagem de manter uma produtividade constante durante a sua vida útil. O fio de pérolas eletrodepositadas, como o ilustrado na Figura 18, apresenta produtividade decrescente ao longo de sua utilização.



**Figura 18** — Por meio deste fio diamantado danificado, podemos observar, além das pérolas diamantadas, o cabo de aço no interior do revestimento plástico.

A tecnologia de corte por fio diamantado, desde a sua introdução na década de 1970, realizou progressos significativos e, hoje, substituiu progressivamente a tecnologia dominante num passado recente, a do fio helicoidal (ALENCAR *et al.*, 1996). A utilização do fio diamantado permite, inclusive, uma melhor qualidade geométrica dos blocos extraídos. Em pedreiras de granito, substituiu com vantagens a utilização do jato de chama e de explosivos (CICCU; VIDAL, 1998).

A Figura 19 mostra a frente de lavra do granito Preto Piracaia, pedreira Maciel Granitos, município de Piracaia, estado de São Paulo.



**Figura 19** — Frente de lavra do granito Preto Piracaia, cortado através do fio diamantado.

A Figura 20 mostra a ranhura obtida com o fio diamantado na mesma pedreira. Para o granito, segundo CICCU; MANCA (1994), a largura desta ranhura é de, aproximadamente, 10 mm. VIDAL; STELLIN JR. (1999) informam, através de dados obtidos na Universidade de Cagliari, que a velocidade do fio varia de 20 a 40 m/s. CICCU; MANCA (1994) fornecem dados sobre a produtividade de corte (2 m<sup>2</sup>/h) e também sobre a perda de

material ( $0,01 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ). Estes dados variam de acordo com o teor de quartzo do material a ser cortado; VIDAL; STELLIN JR. (1999) obtiveram variações de até 45% na produtividade de corte dos granitos Casa Blanca (teor de quartzo de 23%) e Asa Branca (teor de quartzo de 30%).

O custo operacional desta tecnologia, para o corte de granitos, segundo CICCUI; MANCA (1994) é de US\$ 46,25 /  $\text{m}^2$ . O valor, como podemos observar, é alto, devido ao alto custo do próprio fio diamantado.



**Figura 20** — Corte vertical com fio diamantado.

### *Fio helicoidal*

Esta tecnologia de corte foi bastante utilizada no passado, principalmente em pedreiras de mármore ou rochas com baixo ou nenhum teor de quartzo. Baseia-se no movimento, em circuito fechado, de um fio constituído por três cabos de aço “trançados” (Figura 21), tensionado contra a superfície rochosa a ser cortada. O fio serve como veículo para o arraste do material abrasivo que, por sua vez, cortará a rocha.





**Figura 21** — Fio helicoidal.

Nas pedreiras, o fio helicoidal é montado, em circuito fechado, sobre roldanas de guiamento de 60 a 65 cm de diâmetro, orientáveis por meio de sistema de rótula. O movimento ao fio é gerado através de um motor, elétrico ou a diesel, e é transmitido, por atrito, por uma roldana. Esta roldana contém mecanismos de embreagem, transmissões e variador de velocidade. Um contrapeso garante a tensão do fio (FUJIMURA; STELLIN JR., 2001). A Figura 22 ilustra uma frente de lavra de mármore no Espírito Santo.



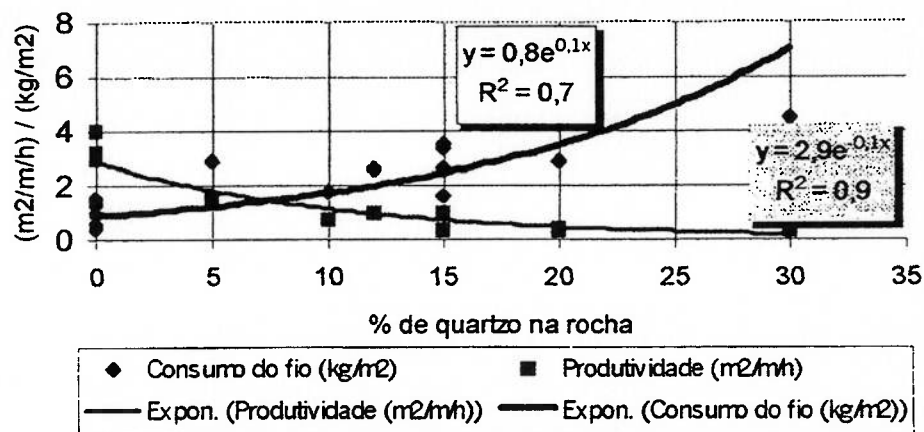
**Figura 22** — Utilização do fio helicoidal para o corte de mármore\*.

---

\* Arquivo pessoal do prof. Fernando Fujimura, do Depto. de Engenharia de Minas e de Petróleo da EPUSP.

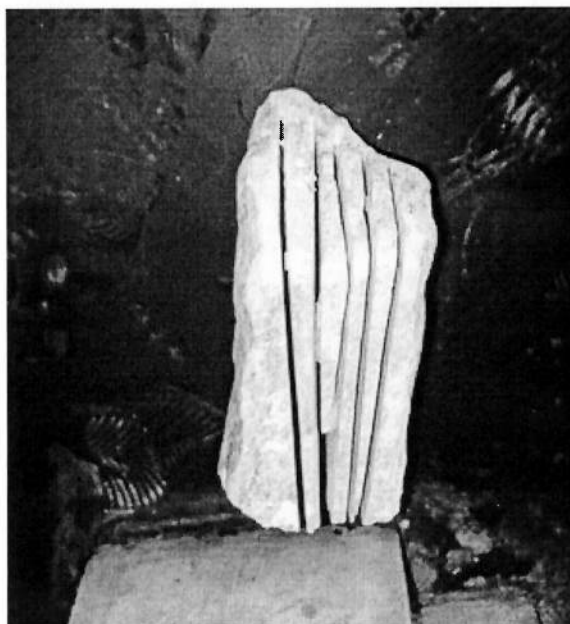
O abrasivo mais utilizado é a areia quartzosa, a qual deve ter granulometria uniforme. O consumo de abrasivo oscila entre 80 e 110 kg/m<sup>2</sup> de corte (FUJIMURA; STELLIN JR., 2001). É interessante notar que o abrasivo deve possuir uma dureza superior à da rocha a ser cortada, para que predomine a ação do abrasivo sobre a rocha, e não o contrário. Esse é um dos motivos de esta tecnologia ser utilizada quase que exclusivamente no corte de mármore e de granitos com baixo teor de quartzo. Se a pretensão é utilizar para o corte de granitos de maior dureza, deve-se utilizar um abrasivo de dureza Mohs elevada, como, por exemplo, o carbetto de silício, tornando o processo economicamente inviável.

Nos laboratórios do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da EPUSP, FUJIMURA; STELLIN JR. (2001) realizaram experimentos de corte por fio helicoidal utilizando diversos tipos de mármore e de granitos. Uma das conclusões a que chegaram é a seguinte: “A diferença de produtividade de corte em m<sup>2</sup>/h, em rochas genericamente designadas de mármore e granito, é bastante significativa, podendo chegar a 10 vezes mais para o mármore em termos relativos, sendo o desgaste do fio exatamente o inverso deste. Não resta muita dúvida quanto ao importante papel exercido pelo conteúdo quartzo, ou a presença de minerais duros, na questão da serrabilidade da rocha, onde a percentagem maior de quartzo na rocha, sempre confere desempenho inferior na serrabilidade da rocha.” Os autores mostraram esta diferença de produtividade através de um gráfico relacionando o teor de quartzo da rocha com a sua produtividade, reproduzido aqui na Figura 23.



**Figura 23** — Produtividade de corte em função do conteúdo de quartzo em rochas cortadas pelo fio helicoidal (FUJIMURA; STELLIN JR., 2001).

Na Figura 24 podemos observar um corpo de prova de mármore cortado pelo fio helicoidal.



**Figura 24** — Aspecto do mármore cortado pelo fio helicoidal\*.

O processo de corte por fio helicoidal está, hoje, em desuso, sendo aos poucos substituído pelo processo de corte por fio diamantado, que apresenta uma produtividade de corte superior.

\* Arquivo pessoal do prof. Fernando Fujimura, do Depto. de Engenharia de Minas e de Petróleo da EPUSP.

### *Cortador a corrente e a corrente diamantada*

O cortador a corrente é constituído de um braço sobre o qual desliza uma corrente com plaquetas de metal duro ou diamantadas, acionado por um grupo motor, como pode ser observado na Figura 25. Segundo STELLIN JÚNIOR; CARANASSIOS (1991), para o corte de mármore se utilizam dentes de metal duro e para rochas duras, como granito, dentes de pastilhas diamantadas.

O comprimento do braço representa uma limitação quanto à altura ou profundidade do corte (ALENCAR *et al.*, 1996). Os modelos utilizados para a lavra a céu aberto executam suas operações de corte sobre trilhos. Em lavras subterrâneas, o aparelho pode ser fixado em colunas de sustentação, em função das limitações de espaço. O corte é executado com água ou a seco.



**Figura 25** — Cortador a corrente diamantada sobre trilhos.\*

No caso do cortador a corrente diamantada, o mecanismo é idêntico ao do cortador a corrente, com a diferença que os dentes de metal duro são substituídos por peças diamantadas e apresentam, ao longo do braço, uma série de furos próximos entre si, através dos quais é injetada água para o seu resfriamento.

---

\* [<http://www.wiley.com/legacy/products/subject/architecture/archdesign/constructioneducation/slides/large/stone1.html>] (acesso em set./2004)].

O movimento do braço é transmitido por uma polia revestida de borracha acoplada a um motor, permitindo maior flexibilidade de marcha e capacidade de auto-adaptação às condições variáveis de corte. Na outra extremidade do braço, a corrente passa por uma coroa livre (ALENCAR *et al.*, 1996). No caso do cortador a corrente diamantada, os elementos diamantados, em formato de paralelepípedo, são dispostos de modo transversal à direção do avanço, soldados a uma base metálica e fixados junto à corrente.

A respeito da produtividade de corte, CICCUI; VIDAL (1998) afirmam que não supera 2 m<sup>2</sup>/h.

Os mesmos autores informam que tanto o processo de corte a corrente quanto a corrente diamantada são métodos não utilizados no Brasil.

Foram descritas, desta maneira, as tecnologias de lavra utilizadas atualmente para a obtenção do bloco de rocha ornamental. A Tabela 1, a seguir, apresenta os custos operacionais das principais tecnologias de lavra utilizadas. A Tabela 2 apresenta alguns parâmetros técnicos relacionados com estas tecnologias.

**Tabela 1** — Custos dos processos de corte utilizados como tecnologias de lavra (US\$/m<sup>2</sup>).

	Jato de chama <sup>1</sup>	Jato d'água <sup>1</sup>	Fio diamantado <sup>1</sup>
Mão-de-obra	15,31	1,25	3,75
Energia elétrica	—	15,63	4,69
Combustível	33,75	—	—
Suprimentos	1,88	7,50	34,36
Outros	—	3,13	3,44
Custo operacional	50,94	27,50	46,25
Depreciação	6,25	18,75	3,13
Custo total	57,19	46,25	49,38

Observação:

<sup>1</sup> CICCUC; MANCA (1994).

**Tabela 2** — Parâmetros técnicos dos processos de corte utilizados como tecnologias de lavra (CICCUC; MANCA, 1994).

	Jato de chama	Jato d'água	Fio diamantado
Produtividade de corte (m <sup>2</sup> /h)	1,0	2,0	2,0
Largura da ranhura (cm)	8,0	5,0	1,0
Perda de material (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	0,175	0,030	0,010

### *Tear*

O tear (assim denominado por sua semelhança com as máquinas de tecelagem) é o equipamento utilizado para o beneficiamento primário do bloco, ou seja, para cortar o bloco em chapas de rocha ornamental. É constituído por uma estrutura metálica retangular formada por quatro colunas que sustentam um quadro, provido de numerosas lâminas de aço dispostas paralelamente umas às outras. O bloco, situado abaixo destas



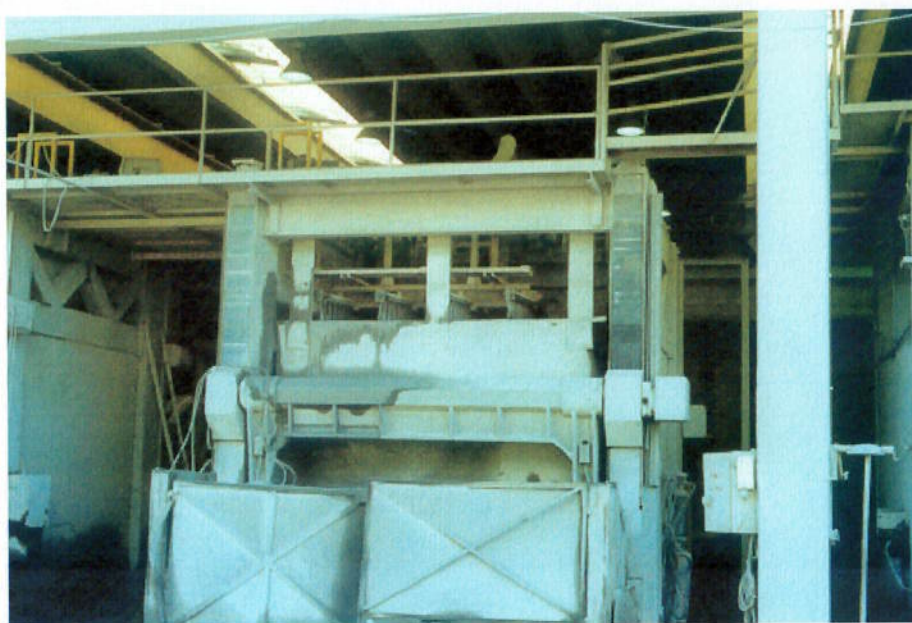
lâminas, é cortado devido à ação de um elemento abrasivo conduzido pelo conjunto de lâminas, que realizam um movimento de vaivém. À medida que o bloco vai sendo cortado, todo o conjunto de lâminas desce automaticamente guiado por quatro suportes dotados de ranhuras helicoidais com dispositivo de avanço regulável, ligados a um motor elétrico. A velocidade de descida das lâminas é determinada fundamentalmente pela natureza do material que está sendo cortado. STELLIN JÚNIOR (1998) afirma que para os mármorees esta velocidade varia de 15 a 30 cm/h. Nos granitos esta velocidade é de, aproximadamente, 4 cm/h.

É importante observar que as dimensões do bloco devem se aproximar das dimensões da chamada “boca” do tear, nome que se dá à entrada do tear, onde se localiza o bloco. Se o bloco possuir dimensões muito inferiores à boca do tear, ocorrerá um desperdício de energia. Nos casos em que o bloco seja irregular, ou possua dimensões superiores à boca do tear, é necessário “ajustá-lo”. Isso se faz cortando as superfícies irregulares através do fio diamantado, como mostra a Figura 26.



**Figura 26** — Utilização do fio diamantado para cortar o bloco antes de o mesmo entrar no tear.

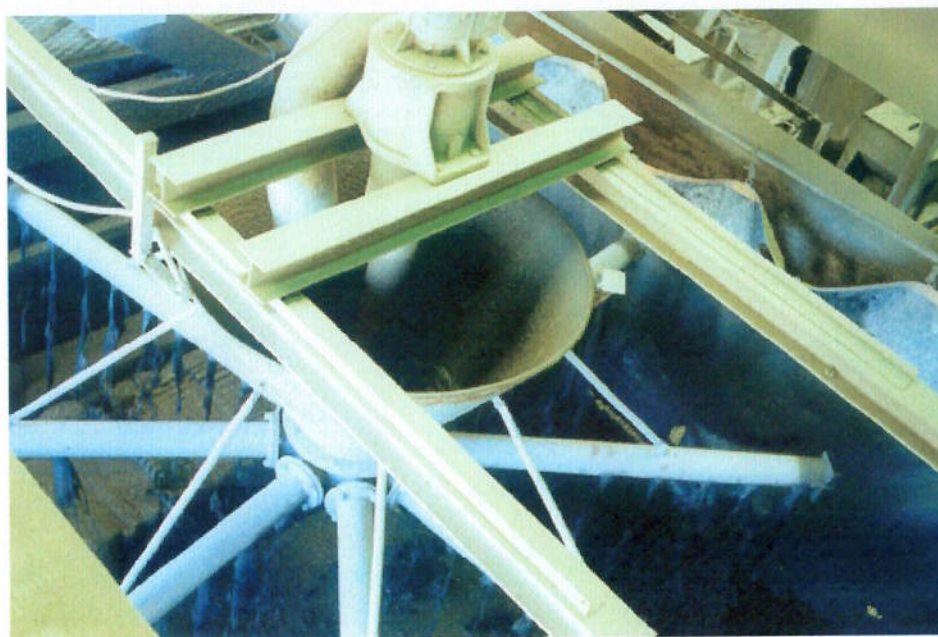
Na Figura 27 podemos apreciar um tear instalado na YKK.



**Figura 27** — Um dos teares instalados na YKK.

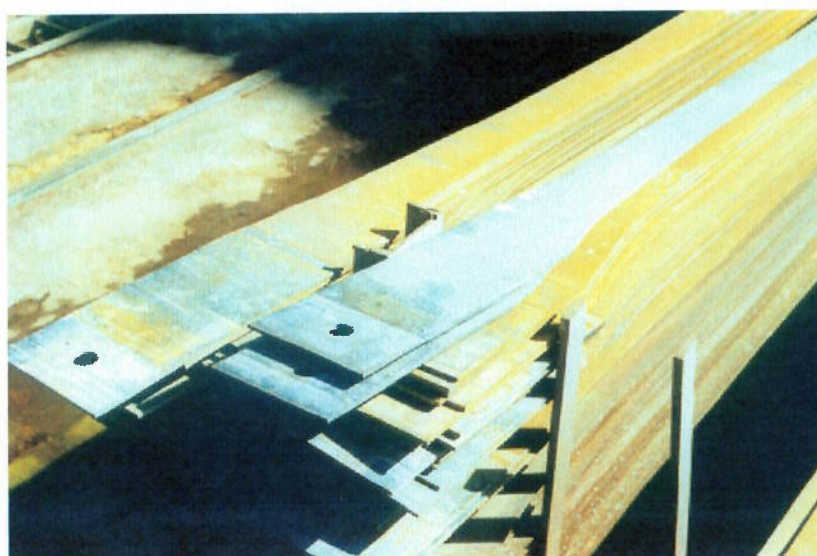
O elemento abrasivo é, na verdade, uma polpa constituída por água, granalha de aço abrasiva, cal e fragmentos de granito e de outras rochas que se estejam serrando (STELLIN JÚNIOR, 1998). Esta polpa deve estar sempre em circulação, e isso é feito por uma bomba submersa de eixo vertical, situada em um poço de recolhimento. O retorno da polpa se dá através de canalização até a parte superior do tear, onde esta é devolvida criando-se uma chuva abrasiva que se distribui nas lâminas e no bloco (Figura 28).





**Figura 28** — Sistema de distribuição da polpa na parte superior do tear.

As lâminas utilizadas no processo são constituídas de aço laminado a quente, ao carbono, com liga. Apresentam resistência média a tração de 5.000 a 6.000 MPa para mármore e pedras de baixa dureza, e de 7.000 a 9.000 MPa para granitos (STELLIN JÚNIOR, 1998). A vida útil das lâminas oscila de uma a três serragens, quando devem, então, ser substituídas. A Figura 29 mostra algumas lâminas desgastadas retiradas de um tear.



**Figura 29** — Lâminas utilizadas no tear.

Durante visita técnica realizada à YKK, o encarregado informou que mármore demoravam, aproximadamente, 12 horas para serem cortados, enquanto que granitos demoravam 72 horas. Segundo STELLIN JÚNIOR (1998), a serrabilidade (termo utilizado pelo autor para determinar a facilidade com que um material pode ser “serrado”) dos granitos não depende da sua composição química, mas da compacidade dos seus materiais, sendo mais fácil serrar os materiais porosos, os alterados física ou quimicamente, os que apresentam microfissuras no interior dos cristais, debilitando a sua estrutura. São mais difíceis de serrar os materiais compactos, de menor porosidade.

Por outro lado, a Diamant D, empresa de renome no setor de ferramentas diamantadas, leva em conta a percentagem de quartzo de vários granitos (5 a 31%) para construir uma escala de serrabilidade que varia de 1 a 10, sendo a classe 10 a mais difícil de serrar.

É interessante notar que a granalha abrasiva constitui a verdadeira ferramenta de corte, enquanto que as lâminas têm a função de conduzir o abrasivo (STELLIN JÚNIOR, 1998).

Mais recentemente, estão sendo utilizados, em caráter experimental, teares com lâminas diamantadas. Nestes equipamentos, o corte é feito através da ação abrasiva de segmentos de pastilhas de diamantes incrustados no gume inferior das lâminas, formando uma espécie de serra acionada em um movimento de vaivém e de descida do quadro de lâminas sobre o bloco (ALENCAR *et al.*, 1996). Equipamentos desse tipo são mais utilizados para o corte de mármore ou rochas de baixa dureza. Em granitos e rochas mais duras, o tear tradicional é preferível.

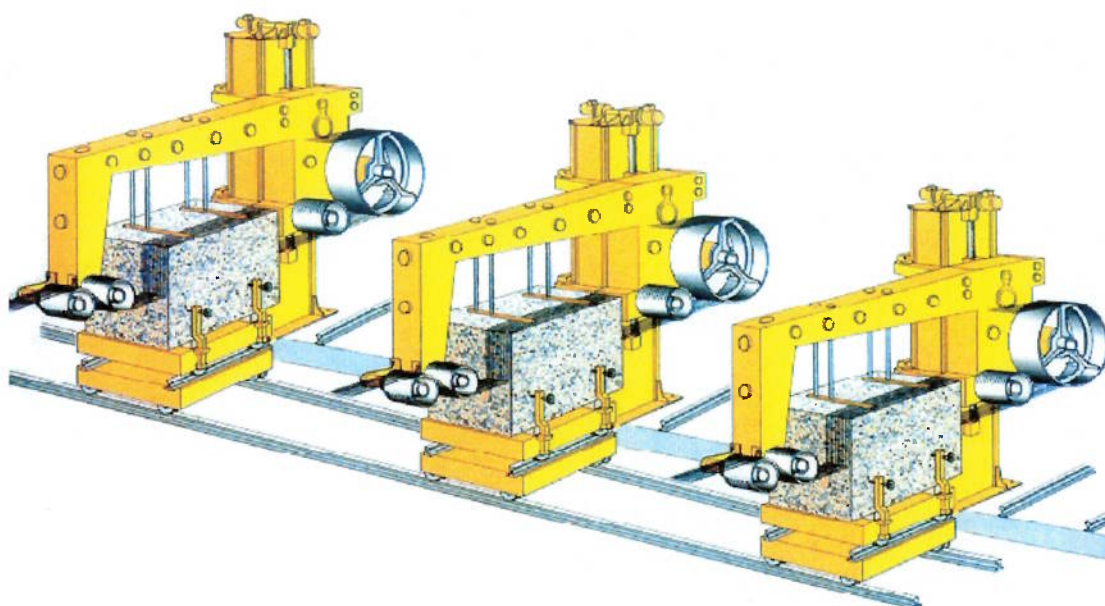
Utilizam-se, também, teares de fio diamantado. Tais teares fazem uso de um fio diamantado (teares monofio) ou vários fios (teares multifio) para executar o corte do bloco. Neste caso não é necessária a polpa abrasiva, visto que o corte é executado pelo próprio fio diamantado, por processo abrasivo descrito anteriormente.

O tear monofio (Figura 30) também é utilizado para ajustar o bloco antes de sua entrada no tear de lâminas (Figura 26).

Os teares multifio (Figuras 31 e 32) apresentam uma produtividade superior ao tear de lâminas, mas a um custo operacional bem superior.



**Figura 30** — Tear monofio.\*

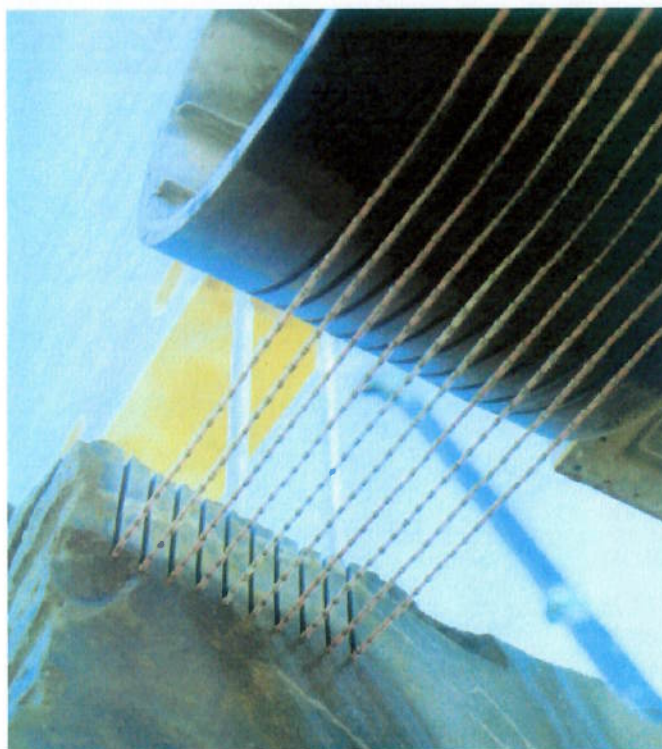


**Figura 31** — Esquema mostrando teares multifios em uma montagem sobre trilhos.†

\* Ilustração obtida de um catálogo da Pellegrini, fabricante de equipamentos para a indústria de rochas ornamentais.

† Ilustração obtida de um catálogo da Wires Engineering, fabricante de equipamentos para a indústria de rochas ornamentais.





**Figura 32** — Detalhe da utilização de um tear multifio.\*

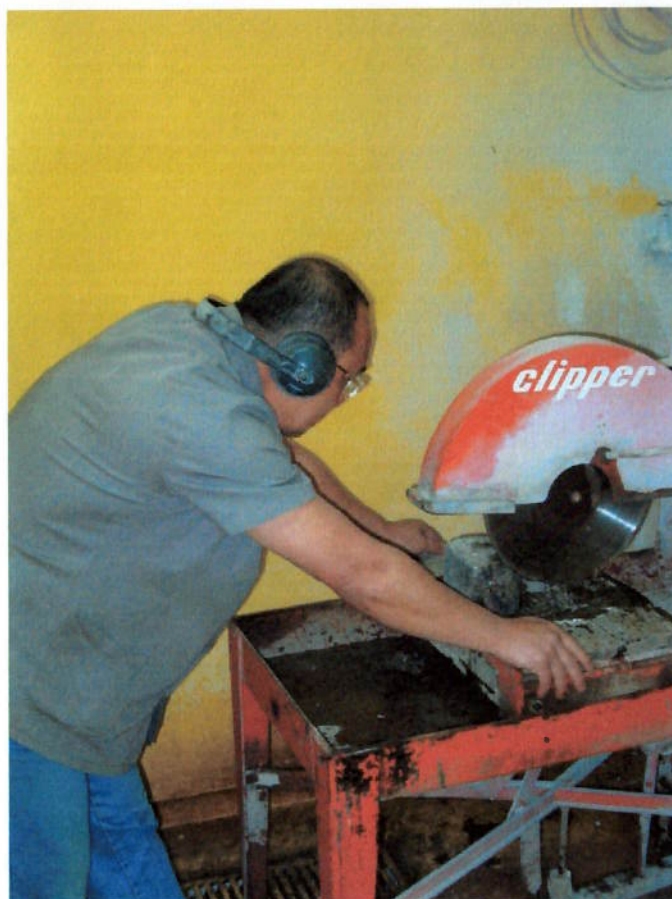
### *Disco diamantado*

O disco diamantado é o equipamento mais utilizado para o corte de chapas de rochas ornamentais. É formado por uma lâmina de aço com um furo no centro, por onde passa o eixo da máquina. O disco é fixado entre duas flanges, e deve ser precisamente balanceado. Na borda do disco são soldados segmentos, formados por uma liga metálica especial denominada matriz, na qual estão imersos os cristais de diamante. A fixação do segmento é feita por uma solda convencional onde há deposição de material metálico unindo a lâmina e a matriz. O material é cortado devido ao atrito entre os segmentos sintetizados com grãos de diamante, fixados na borda de ataque do disco, resultando da conjugação dos movimentos de rotação dos discos e de translação do mandril (ALENCAR *et al.*, 1996). Nas marmorarias, o conjunto motor-disco é fixado em uma estrutura móvel; a chapa ou o material a ser cortado se localizam abaixo do disco, como pode

---

\* Ilustração obtida de um catálogo da Wires Engineering, fabricante de equipamentos para a indústria de rochas ornamentais.

ser observado na Figura 7. Equipamento similar, com mesa menor, pode ser utilizado para cortar pequenas chapas ou para a confecção de corpos de prova (Figura 33). A Figura 34 mostra detalhes do disco. Note-se que a água para refrigeração do disco é obrigatória no processo, embora existam discos diamantados, para equipamentos manuais, desenvolvidos para o trabalho a seco.



**Figura 33** — Equipamento de disco diamantado montado em laboratório no Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da EPUSP.



**Figura 34** — Detalhe do equipamento de corte por disco diamantado. A profundidade máxima de corte é limitada pelo raio do disco.

Um importante parâmetro do processo que deve ser levado em consideração é a velocidade linear na periferia do disco, que é dada por:

$$v_d = \omega \times \frac{D}{2} \quad (1)$$

onde:

$v_d$  é a velocidade na periferia do disco;

$\omega$  é a velocidade angular do disco;

$D$  é o diâmetro do disco.

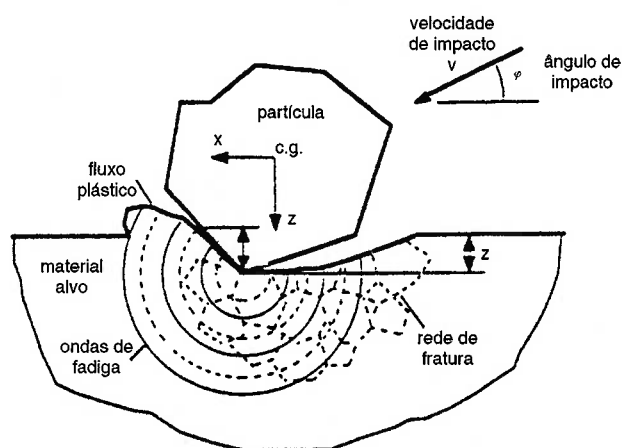
Se, por exemplo, um disco de 150 mm de diâmetro estiver trabalhando em um motor cujo eixo gira a uma velocidade angular ( $\omega$ ) de 377 rad/s (equivalente a 3.600 rpm), a velocidade na periferia do disco ( $v_d$ ) será de, aproximadamente, 28 m/s. Mas se aumentarmos o diâmetro do disco para 350 mm, com o objetivo de cortar materiais de maior espessura, a velocidade periférica atingirá o valor de 66 m/s, o que poderá provocar aquecimento excessivo na borda diamantada. Sugere-se, neste caso, utilizar um motor de menor rotação.

Existem, no mercado, diversos tipos de discos diamantados de diferentes diâmetros, diferentes concentrações de diamante e de

características construtivas diversas, que variam de acordo com a aplicação a que se destinam. A qualidade e o rendimento do disco depende basicamente dos seguintes fatores: a quantidade, o tipo, a granulometria e a qualidade do diamante misturado à liga; o tipo de liga metálica e a espessura de corte e a vida da camada (borda).

#### 4.2.3 Por impacto/erosão

O processo de corte por impacto/erosão consiste em dirigir, contra a superfície da rocha, partículas abrasivas de minerais de alta dureza, alta densidade e dotadas de alta velocidade e, portanto, com alta energia cinética. Um meio de acelerar estas partículas, para que elas adquiram alta velocidade, é através de um jato d'água também de alta velocidade. Este jato é obtido através da passagem da água, sob alta pressão, através de um orifício de dimensões reduzidas. Deste modo, água e partículas de abrasivo impactam, com alta velocidade, o material a ser cortado. ZENG; KIM (1996) e RAMULU (1993) *apud* MOMBER; KOVACEVIC (1998), afirmam que, em seguida ao impacto, ocorre a formação de uma rede de ruptura nas vizinhanças do local deste impacto, como ilustrado na Figura 35.



**Figura 35** — Os dois processos de remoção do material: impacto e rede de rompimento (ZENG; KIM, 1996).

### *Jato d'água abrasivo*

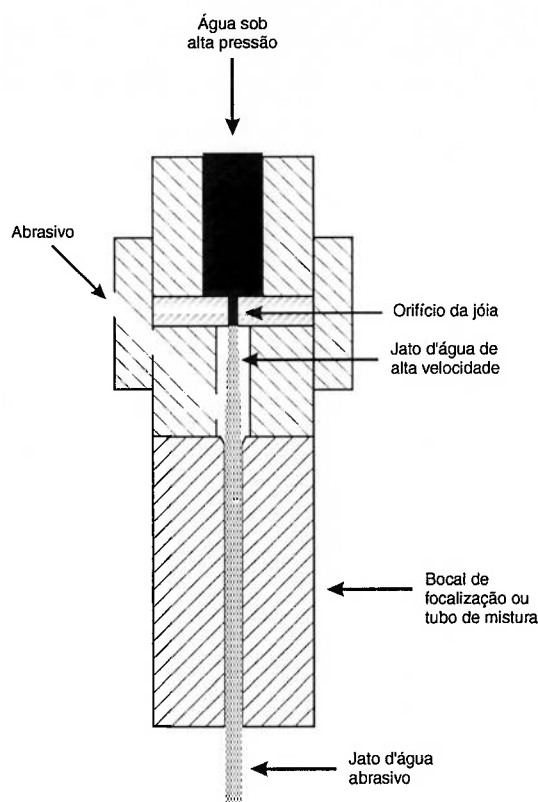
No processo de corte por jato d'água abrasivo, a remoção de material ocorre devido a duas ações: primeira, o impacto, contra o material alvo, de partículas de abrasivo dotadas de grande velocidade e, portanto, de alta energia cinética; segunda, a erosão provocada pela água. Esta desempenha um papel importantíssimo na remoção do material. Deve-se lembrar que, embora seja fluida, está dotada de grande velocidade, sendo grande o seu poder de erosão.

Como explicado anteriormente, as partículas de abrasivo são aceleradas por um jato fluido de alta velocidade, gerado pela passagem da água, sob alta pressão, através de um orifício de pequeno diâmetro. Este orifício, geralmente de safira ou rubi, é chamado "jóia".

Dois sistemas distintos podem ser utilizados para misturar o abrasivo granular no jato d'água, ou seja, para gerar o jato d'água abrasivo. O primeiro processo é o chamado *ASJ*, sigla em inglês para *Abrasive Suspension Jet*, ou jato abrasivo de suspensão. Neste processo, o abrasivo, através de uma câmara, é pré-misturado ao jato d'água. AGUS *et al.* (1995) apresentam o desempenho e aplicações para esta modalidade de equipamento. O segundo processo é denominado *AWJ* (*Abrasive Water Jet*, ou jato d'água abrasivo). Neste, o abrasivo, e também uma grande quantidade de ar, são "sugados" devido à diferença de pressão gerada pelo jato d'água em alta velocidade (efeito "tubo de Venturi"). As partículas de abrasivo são, então, aceleradas pelo jato d'água de alta velocidade, atingindo o material. O processo de jato d'água abrasivo gera um jato trifásico, composto por água, abrasivo e ar.

A Figura 36 apresenta o esquema de um cabeçote de jato d'água abrasivo. O bocal de focalização é constituído de material bastante duro, normalmente o carbeto de tungstênio, pois deve ser capaz de resistir à passagem do abrasivo em alta velocidade.





**Figura 36** — Esquema de um cabeçote de jato d'água abrasivo.

O abrasivo mais utilizado nos equipamentos de corte por jato d'água abrasivo é a granada, em uma granulometria que pode variar de 60 a 120 *mesh*. A granada é o material que apresenta a melhor relação *performance* / desgaste do bocal. Outros materiais podem ser utilizados, mas, se possuírem dureza Mohs muito alta (8,5 ou 9) provocaram um desgaste acentuado do bocal do equipamento, abreviando a sua vida útil; se, por outro lado, apresentarem dureza Mohs baixa (5 a 7), deixarão a desejar com relação à *performance*, sendo necessário a utilização de velocidades muito baixas do bocal, tornando o processo de corte muito lento. LAUAND *et al.* (2004) apresentam os resultados de experiências utilizando-se óxido de alumínio eletrofundido marrom, um abrasivo sintético, para o corte de granito. Os autores mostraram que a profundidade de corte é bem superior à obtida com a utilização de granada, mas, por outro lado, os danos ao bocal foram inevitáveis. MARTÍN CORTÉS *et al.* (2003) debatem a respeito do reaproveitamento da granada já utilizada no equipamento de jato d'água

abrasivo, mostrando suas características e comparando com a granada virgem.

HENNIES *et al.* (2001) apresentam experiências com a utilização de granada obtida no rejeito do processamento de areia monazítica. MARTINEC *et al.* (2002) tratam da utilização da olivina como abrasivo, expondo não só os resultados de experimentos, como também as características tecnológicas do mineral.

O processo de jato d'água abrasivo pode ser utilizado para cortar qualquer tipo de material de engenharia, desde madeira até vidro, incluindo plástico, todos os tipos de metais, como ferro, aço, alumínio, etc. Foi utilizado, com sucesso, para o corte de solo, com o objetivo de obter corpos-de-prova para ensaio de compressão. BOSCHESI MAZUQUI (2004) apresenta todo o processo de obtenção dos corpos-de-prova de solos por meio do jato d'água puro. Mostra, inclusive, os resultados obtidos quando da utilização de vários tipos de solos, com características diferentes.

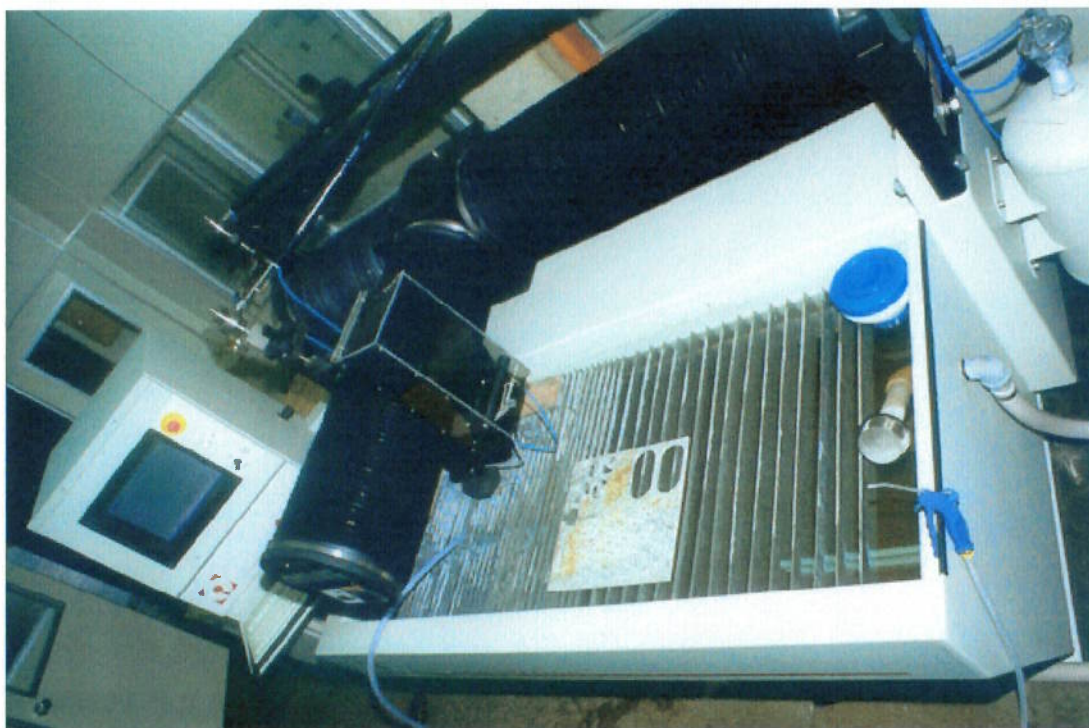
HENNIES *et al.* (2002) apresentam informações referentes não só ao corte, mas também à gravação, de materiais friáveis. No processo de gravação, o jato não atravessa o material, apenas abre uma ranhura de pequena profundidade. STELLIN JÚNIOR *et al.* (2004) descrevem o processo de gravação em granitos através do jato d'água puro. LAUAND (2004) mostra os procedimentos necessários para a execução de gravações em rochas ornamentais. Apresenta, inclusive, dados sobre a profundidade da ranhura obtida em função da pressão hidráulica utilizada.

HENNIES *et al.* (2004) mostram os resultados obtidos quando o processo de jato d'água abrasivo é utilizado para o corte de polipropileno. Os autores descrevem o equipamento e apresentam os resultados obtidos quando da utilização de diferentes velocidades de bocais. Também apresentam os resultados obtidos com a utilização de jato d'água puro.

LAUAND *et al.* (2002) apresentam os resultados do corte de ladrilhos cerâmicos com jato d'água abrasivo. Aliás, os ladrilhos de cerâmica são materiais de corte relativamente rápido, pois possuem pequena espessura.

Os autores mostram uma interessante composição com duas tonalidades diferentes de ladrilhos.

A Figura 37 mostra o equipamento instalado no Laboratório de Mecânica de Rochas do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da EPUSP. Podemos notar o tanque de água, com profundidade aproximada de 1 m; acima deste as travessas de metal que servem de apoio às peças a serem cortadas (um ladrilho de rocha ornamental, no caso da figura). A estrutura sanfonada preta sustenta o cabeçote do jato d'água e o depósito de abrasivo. Esta estrutura se movimenta horizontalmente por sobre o tanque; o movimento é controlado pelo computador, visto à esquerda, na Figura 37. O programa controlador permite a execução de desenhos de geometria complexa com pouca intervenção do usuário. Além disso, o programa controla a velocidade do bocal e fornece informações a respeito do consumo de abrasivo, consumo de água, tempo de execução do corte, etc.



**Figura 37** — Vista do equipamento de corte por jato d'água instalado no Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da EPUSP.

A Figura 38 mostra a unidade de pressurização de água do sistema, onde podemos ver os dois filtros de entrada (azuis, à direita), painel de controle (acima dos filtros) e bomba a pistão (verde). Esta bomba é acionada por uma correia (protegida por uma capa metálica amarela) conectada ao eixo de um motor elétrico de 20 kW (em azul, abaixo da bomba). Todo o sistema é controlado pelo computador, mostrado na Figura 37.



**Figura 38** — Unidade de pressurização de água do equipamento de corte por jato d'água abrasivo.

Visto que o jato d'água abrasivo e disco diamantado são, atualmente, os dois processos mais utilizados para o corte de chapas e ladrilhos de rocha ornamental, cabe aqui uma comparação entre ambos. A Tabela 3, a seguir, enumera as características mais importantes que devem ser observadas em um equipamento de corte de chapas de rochas ornamentais, apresentando as vantagens e desvantagens de cada processo.

**Tabela 3** — Comparação entre os equipamentos de corte de chapas e ladrilhos de rocha ornamental.

Característica	Disco diamantado	Jato d'água abrasivo
Acabamento da superfície	Dependendo da aplicação do material cortado, satisfatório. Deixa marcas do disco no material.	A velocidade do bocal vai determinar o acabamento requerido: velocidades baixas, acabamento bom; velocidades altas, acabamento ruim. Isso permite que o usuário escolha a melhor relação velocidade de corte / acabamento.*
Custos	Custo de aquisição e custo operacional baixos.	Tanto o custo de aquisição como o custo operacional são elevados.
Espessura máxima de corte	Limitada ao raio do disco.	Ilimitada, dependendo apenas da pressão hidráulica do equipamento.
Geometria do corte	Cortes apenas em linha reta. Curvas somente com raio relativamente grande.	Permite a execução de cortes de geometria complexa. O desenho pode ser previamente elaborado em AutoCad e executado automaticamente pelo equipamento.

\* Marcas, denominadas estrias, aparecem na superfície do material cortado quando da utilização de altas velocidades de bocal. Na realidade, a superfície do material cortado por jato d'água abrasivo é constituída de duas regiões com características distintas. A parte superior da superfície, denominada "região de corte liso" apresenta um bom acabamento. A parte inferior é denominada "região de corte rugoso" e apresenta estrias ou ondulações, cuja origem ainda não está bem definida. Quanto maior a velocidade do bocal, maior será a altura da região de corte rugoso. HASHISH (1999) afirma que a formação dessas estrias está ligada à geometria do jato: à medida que este penetra no material, o seu diâmetro efetivo se torna menor, devido ao atrito com as paredes do material, ocorrendo uma redução na energia de impacto do abrasivo, devido à deflexão e ao ricochetear do próprio jato. CHAO; GESKIN (1993) discordam. Segundo eles, a presença de estrias, ou ondulações, é um fenômeno típico dos processos de corte através de feixes de alta energia (laser, plasma, etc.), e sua formação está ligada a instabilidades do sistema, e não apenas do jato. As vibrações do bocal e do sistema de movimentação do mesmo contribuem, segundo os autores, para a formação das estrias. Por outro lado, NIU *et al.* (1997) concluíram que as estrias se formam devido a fenômenos que ocorrem em regiões próximas ao início do corte, ou seja, na região de corte liso. Não se chegou, ainda, a nenhuma conclusão a respeito da formação da região de corte rugoso.



<b>Característica</b>	<b>Disco diamantado</b>	<b>Jato d'água abrasivo</b>
Manuseio	Fácil, existindo, inclusive, equipamentos portáteis para a execução de cortes <i>in loco</i> .	Requer treinamento e algum conhecimento de informática para a operação.
Manutenção	Simples, requerendo a troca periódica do disco.	Requer conhecimentos de hidráulica de alta pressão. Existem algumas peças de difícil reposição.
Precisão	Relativa, e apenas em corte de linha reta.	Alta. Como o diâmetro do jato é menor que 1 mm, permite a execução de desenhos bastante detalhados.
Produtividade de corte	Velocidade de corte satisfatória.	Para cortes em linha reta, ou de grande raio, satisfatória. A velocidade diminui bastante para a execução de curvas de pequeno raio ou cortes de geometria complexa em materiais de grande espessura.
Versatilidade	O equipamento executa somente cortes. Para executar furos de pequeno diâmetro, deve-se utilizar brocas. Furos de maior diâmetro devem ser executados com a serra "copo" diamantada. Não permite a execução de ranhuras para gravação em chapas ou ladrilhos.	O equipamento corta e faz furos de qualquer diâmetro sem a necessidade de troca de algum dispositivo. Não é necessária nem a interrupção do trabalho. É possível a execução de ranhuras ou furos não passantes, permitindo, deste modo, a gravação no material*.

Esta tabela compara os dois tipos de equipamento quando utilizados para o corte de chapas ou ladrilhos de rochas ornamentais. Não houve a intenção de comparar bananas com laranjas, como diz o ditado popular. O equipamento de disco diamantado é muito simples, de fácil manuseio e

\* LAUAND (2004) apresenta o procedimento e os dados obtidos em experimentos de gravação de mármore e granito por jato d'água abrasivo.

baixo custo. Já o equipamento de corte por jato d'água abrasivo é complexo, envolvendo tecnologia mais avançada, permitindo, além do corte de rochas ornamentais, o corte, furação e gravação de praticamente todos os materiais de engenharia, tornando-o de uma versatilidade infinitamente maior. Mas, como dissemos, os dois equipamentos podem, e são, utilizados para o corte de chapas e ladrilhos de rochas ornamentais.

Foram apresentadas, deste modo, as principais tecnologias utilizadas para o corte de rochas ornamentais, desde a extração até o beneficiamento final, como apresentado no diagrama da Figura 13. É importante ressaltar que neste diagrama estão apresentadas as tecnologias usualmente e racionalmente utilizadas nas diversas etapas do processamento de rochas ornamentais. Nada impede que se utilize, por exemplo, jato d'água abrasivo para o corte de blocos em pedreiras. Não é usual, pois o jato d'água abrasivo não é econômico para a abertura de grandes fendas em rochas, requerendo uma quantidade, ou fluxo, muito grande de abrasivo, sendo mais racional a utilização do jato d'água puro. Este, por sua vez, pode ser utilizado para o corte de chapas ou ladrilhos, durante o beneficiamento final de rochas ornamentais; mas, neste caso, o jato d'água abrasivo apresenta desempenho muito superior. O fio diamantado, por exemplo, utilizado como tecnologia de lavra, é também utilizado para o corte de superfícies irregulares do bloco, antes da entrada deste no tear (Figura 26). Além disso, esta tecnologia é utilizada, também, para o desdobramento do bloco, como mostrado nas Figuras 30, 31 e 32.



## 5. SELEÇÃO DAS ROCHAS

Com o objetivo de verificar a relação existente entre as características tecnológicas de algumas rochas brasileiras e o desempenho destas quando cortadas através do processo de jato d'água abrasivo, três diferentes tipos de granito, um mármore e dois tipos de diabásio, todos provenientes do Estado de São Paulo, foram selecionados como materiais a serem ensaiados.

Neste capítulo apresentaremos as características tecnológicas das rochas experimentadas, suas principais utilizações e os processos de extração.

A Figura 39, a seguir, mostra a localização das pedreiras no Estado de São Paulo.

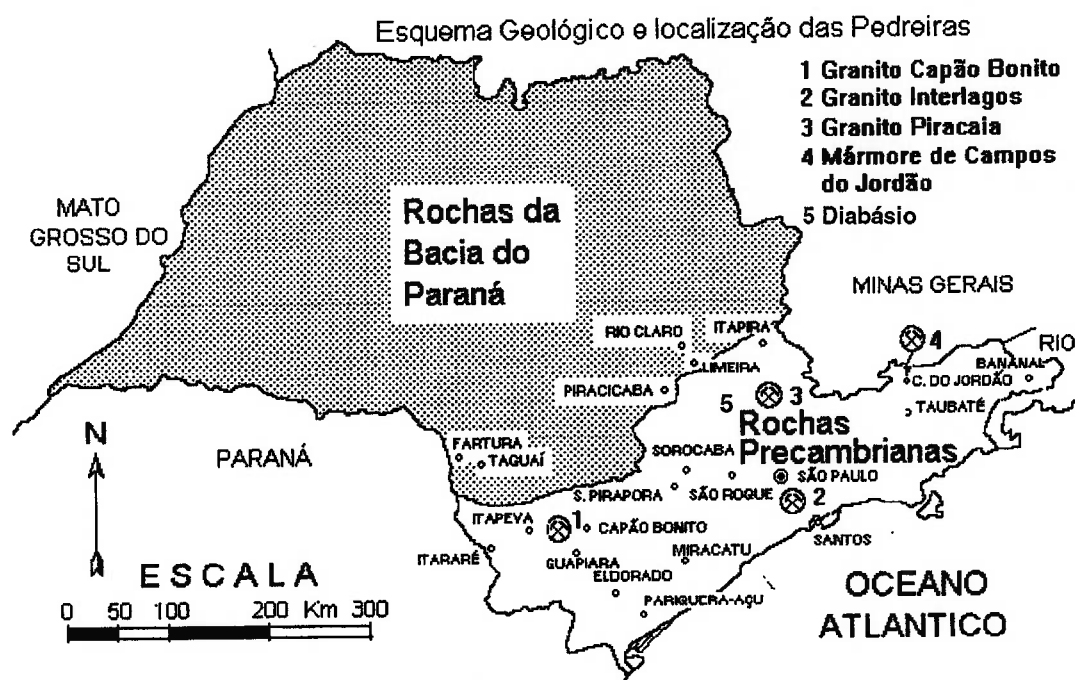


Figura 39 — Localização das pedreiras.

Os três tipos de granito selecionados foram o Vermelho Capão Bonito, o Prata Interlagos e o Preto Piracaia, apresentado aqui em duas variedades. O mármore utilizado é o Branco Campos do Jordão. A única rocha “não-ornamental” ensaiada é o diabásio, em duas variedades, utilizado como agregado de concreto na construção civil.

## 5.1 PROCESSOS DE EXTRAÇÃO E UTILIZAÇÃO DAS ROCHAS

### 5.1.1 Granito Prata Interlagos

O granito Prata Interlagos é explorado pela Mineração Viterbo Machado Luz, no bairro de Parelheiros, município de São Paulo. A pedreira se localiza em zona densamente povoada ao sul da cidade, e o acesso é possível por vias urbanas, sendo pequeno o trecho em terra.

A área de mineração situa-se sobre um maciço granítico sintectônico, de idade pré-Cambriana, intrusivo em rochas do grupo Açungui. Estas são constituídas predominantemente por migmatitos homogêneos do Complexo Embu e por xistos, filitos, metassiltitos, quartzitos, metaconglomerados e anfibolitos do Complexo Pilar (BORN *et al.*, 1996).

A lavra se dava por um processo, pode-se dizer, artesanal e inconstante. A Figura 40 ilustra algumas das ferramentas utilizadas para a extração dos blocos.

Atualmente a produção do granito se encontra paralisada, visto não ser esta a principal atividade da Mineração Viterbo Machado Luz. Existem projetos para a abertura de uma frente para a produção de brita\*.

---

\* Segundo informações obtidas por contato telefônico com o encarregado da Mineração Viterbo Machado Luz, eng. João Manoel.



**Figura 40** — Ferramentas utilizadas para a extração do granito Prata Interlagos.

### 5.1.2 Granito Preto Piracaia

Segundo JANASI (1986) *apud* CARUSO (1990), o Complexo Intermediário Piracaia ocupa uma área de 32 km<sup>2</sup>. É composto por uma suíte de rochas em boa parte gnaissificadas e metamorfoseadas, dominada por monzodioritos e monzonitos, mas com variações desde dioritos até álcali-quartzo sienitos e álcali granitos. Apresentam granulação muito fina a grossa.

O granito Preto Piracaia é explorado no município de Piracaia, ao norte da capital. É um material escuro, utilizado principalmente para artes funerárias, tais como lápides de túmulos em cemitérios, e, em alguns casos como fachadas de prédios. A extração dos blocos deste granito é bastante antiga, datando da década de 1930 (LAUAND, 2001).

O granito é de idade Precambriana e pertence ao escudo de rochas cristalinas do Brasil.

A cidade de Piracaia dista da capital paulista cerca de 100 km por rodovias asfaltadas, e possui atualmente empresas que se dedicam à extração e ao beneficiamento de rochas ornamentais, bem como à sua comercialização.

Nos arredores de Piracaia, havia outrora, nas colinas, grande quantidade de matacões, os quais eram explorados pela Irmãos Fiorelini. Contudo, com a sua extração, os mesmos desapareceram, e foi necessário, como em muitos outros locais do Brasil, partir-se para a extração de blocos no maciço rochoso. Assim, por volta de 2000, uma empresa de Mineração denominada Maciel Granitos iniciou as operações para extração mais racional do maciço rochoso.

A pedra da Maciel Granitos está localizada a cerca de 2 km por estrada de terra carroçável a oeste do centro de Piracaia. Nesta pedra há ocorrência de dois tipos quanto à granulometria. O mais tradicional, de granulação mais grossa, e que vem sendo intensivamente explotado, surge em grande parte da pedra (Figura 41). Uma nova frente vem sendo aberta em um material de granulação mais fina (Figura 42).



**Figura 41** — Lavra de blocos do granito Preto Piracaia.





**Figura 42** — Frente de lavra do granito Preto Piracaia (material de granulometria mais fina).

Atualmente, existem na pedreira duas bancadas, onde os blocos de granito são extraídos. A seqüência das operações unitárias de lavra consiste das seguintes etapas:

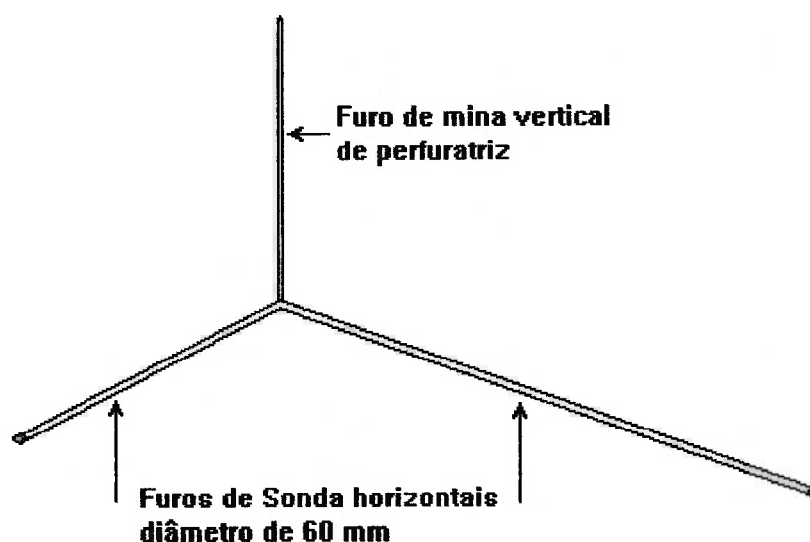
- a) Retirada da cobertura.
- b) Preparo da bancada para corte do grande bloco (duas sondagens horizontais e uma perfuração de furo de mina para passagem do fio diamantado).
- c) Corte no plano vertical e piso pelo fio diamantado.
- d) Perfuração de furo de mina e corte por pólvora para desmembramento do grande bloco.
- e) Retaliação final dos blocos a dimensão desejada com linha de furos de mina paralelos de pequeno espaçamento.

A primeira operação unitária de lavra da pedreira consistiu na remoção da cobertura de solo para expor o maciço rochoso. Esta operação foi realizada com jatos d'água convencionais. A Figura 41 fornece uma idéia da espessura deste solo de cobertura.

A seguir, usa-se para recorte de grandes blocos o sistema de fio diamantado. Para isto são necessárias duas etapas: 1) preparo da bancada para o corte e 2) corte propriamente dito com o fio diamantado.

Na fase de preparo, duas sondagens horizontais com 60 mm de diâmetro são realizadas, além de um furo de mina vertical. Os três furos devem se encontrar no seio da rocha, para que cabos de aço possam ser passados pelos mesmos. A Figura 43 mostra um esquema destes furos para o preparo da bancada e separação dos grandes blocos.

Nem todos os granitos apresentam três direções de partição ortogonais. Este é o caso do granito Preto Piracaia. Na extração de blocos de rochas ornamentais ou pedras dimensionadas, estas direções são denominadas corrida, segundo e trincante. A corrida é a direção mais bem definida; o segundo e o trincante, de direção ortogonal ao plano da corrida, são em geral menos definidos. No caso do granito Preto Piracaia, o trincante, ao invés de seu plano ser ortogonal ao segundo, é de  $57^\circ$ , o que causa certos transtornos.

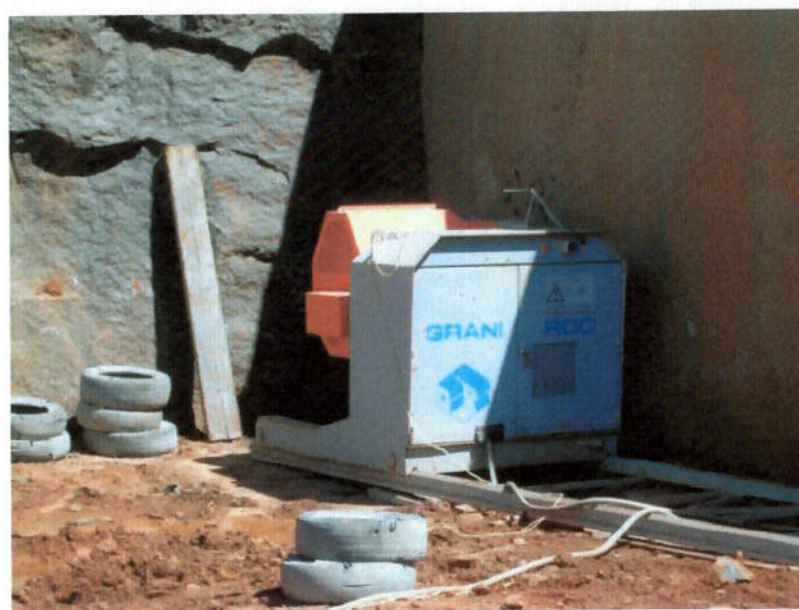


**Figura 43** — Esquema de furos para preparo do corte dos grandes blocos por fio diamantado.

Os dois furos de sonda são elaborados ortogonais ao plano da corrida e ao do trincante, enquanto o furo de mina é elaborado normal ao plano do segundo.

Realizados estes três furos, cabos de aço são atravessados pelos mesmos para possibilitar a travessia dos fios diamantados.

A operação unitária seguinte constitui no corte do plano dos grandes blocos com o fio diamantado. Os dois planos são, então, cortados pela ação do fio diamantado, ou seja, no plano vertical da corrida e no plano horizontal do piso da bancada que constitui o segundo. O mecanismo do fio diamantado (Figura 44) dispõe de uma estrutura que se desloca por uma guia de trilhos podendo realizar cortes verticais ou horizontais.



**Figura 44** — Motor e mecanismo de força do fio diamantado.

Os grandes blocos são, a seguir, recortados para que atinjam dimensões apropriadas para seu manuseio, transporte ou uso. Este recorte inicial é feito por “fogacho”, usando como explosivo a pólvora negra, no plano ortogonal do trincante. A Figura 45 mostra um detalhe do corte obtido desta maneira.





**Figura 45** — Corte obtido com explosivo no plano ortogonal do trincante.

A última operação unitária consiste na obtenção de blocos paralelepípedicos, para a qual se usa uma série de furos de mina paralelos. A Figura 46 mostra os detalhes de um bloco final obtido por esta técnica.



**Figura 46** — Bloco de granito Preto Piracaia pronto para o transporte.

### 5.1.3 Granito Vermelho Capão Bonito

O maciço granítico de Capão Bonito aflora a N do extremo NE do extenso batólito granítico-gnáissico de Três Córregos, conjuntamente com outros maciços granitóides rosados, supostamente pós-tectônicos. Este é intrusivo em rochas gnáissicas que constituem localmente o embasamento do grupo Açungui e em rochas quartzíticas da base deste grupo (FILIPOV, 2002).

O granito Vermelho Capão Bonito é extraído nas proximidades do município de Capão Bonito, sul do estado de São Paulo. Uma das responsáveis pela exploração do material é a Somibrás. A Figura 47 mostra uma vista geral da pedreira. A extração, por bancadas e com a utilização da tecnologia de jato de chama nos cortes verticais, é muito bem descrita e detalhada por HENNIES *et al.* (1999). Na Figura 48 podemos observar a fenda obtida com a utilização do jato de chama.

O granito Vermelho Capão Bonito é muito utilizado e apreciado na construção civil, tanto para pisos como para fachadas, principalmente em prédios. É indicado em aplicações externas, pois é bastante resistente às intempéries.



**Figura 47** — Vista geral da pedreira em Capão Bonito.





**Figura 48** — Frente de lavra da Somibrás, em Capão Bonito.

#### **5.1.4 Mármore Branco Campos do Jordão**

A região do Planalto de Campos do Jordão está situada na parte nordeste do estado de São Paulo, e é composta de rochas do pré-cambriano, representadas por migmatitos homogêneos e heterogêneos. Este complexo é cortado por numerosas camadas de quartzito e dolomito, assim como corpos de granito (SZIKSKAY; TEISSEDE, 1979).

O mármore Branco Campos do Jordão é um mármore dolomítico branco, parcialmente explorado como pedra ornamental, outra parcela como rocha ornamental e, finalmente, outras duas parcelas são comercializadas como corretivo de solo, ou como elemento na produção de cimento branco, sendo nestas duas alternativas moído e finamente pulverizado. Este mármore é encontrado em camada encaixada em

migmatitos precambrianos que ocorrem próximos à cidade de Campos do Jordão, na serra da Mantiqueira, estado de São Paulo.

As amostras utilizadas nos experimentos foram coletadas diretamente na pedreira, localizada na Barra do Turvo, no Bairro dos Marmelos, próximo ao ribeirão de mesmo nome, a 21 quilômetros da cidade, através de acesso por via não asfaltada, distando 11 quilômetros das instalações de extração de água Minalba. A Figura 49 mostra uma visão parcial da pedreira e da serraria onde o mármore é processado.



**Figura 49** — Vista geral da pedreira no município de Campos do Jordão.

A extração do material é feita de maneira precária e a exploração é limitada. O Mármore Branco Campos do Jordão tem utilização muito limitada como rocha ornamental, devido, principalmente, ao grande número de fissuras que apresenta, fornecendo, por esse motivos, blocos de pequenas dimensões (Figura 50), utilizados para confecção de peças artesanais e ornamentais. Na Figura 51 podemos apreciar as peças ornamentais confeccionadas na própria serraria por artesãos da região.



**Figura 50** — Blocos pequenos, utilizados para artesanato.



**Figura 51** — Peças decorativas, no momento a principal utilização do mármore Branco Campos do Jordão.



### 5.1.5 Diabásio

As rochas ígneas originadas durante o vulcanismo básico mesozóico, conhecidas pelo nome de Formação Serra Geral, foram também objeto de estudo. As amostras do diabásio (uma de granulação muito grossa e outra de granulação normal) foram colhidas na pedreira Basalto 5, que faz parte do grupo de pedreiras Basalto, e está localizada na rodovia Campinas-Monte Mor (SP 101), km 2,3, no município de Campinas, estado de São Paulo. A frente de lavra pode ser observada na Figura 52.



**Figura 52** — Vista da frente de lavra.

O diabásio extraído é utilizado como agregado para a construção civil. Vários tipos de agregado são comercializados de acordo com a exigência do cliente. Esta rocha não é usada como rocha ornamental, pelo fato de na origem possuir diaclases de contração (Figura 53), pelo resfriamento do magma básico o que impossibilita a obtenção de blocos de maiores dimensões.





**Figura 53** — Detalhe de juntas ou diaclases no dique de diabásio.

Exame cuidadoso desta exploração permitiu verificar que a rocha possuía por vezes granulação grossa onde os plagioclásios e piroxênios eram visíveis a vista desarmada. Outros afloramentos tinham a característica mais comum destas rochas, onde a granulação é fina e apenas com auxílio de uma lupa é possível distinguir seus minerais, que são os feldspatos sialicos como prismas de plagioclásio (labradorita) e os piroxênios máficos. A rocha em seu todo possui coloração cinza-escura.

Amostras dos dois tipos de granulação, grossa e fina (esta última mais comum), foram coletadas para o preparo de corpos de prova.

## **5.2 CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DAS ROCHAS**

As Tabelas 4, 5, 6 e 7 apresentam, respectivamente, algumas das características tecnológicas mais importantes do granito Prata Interlagos (BORN *et al.*, 1996), granito Vermelho Capão Bonito (HENNIES *et al.*,

1999), granito Preto Piracaia (CARUSO, 1990) e mármore Branco Campos do Jordão (CARUSO, 1990).

**Tabela 4** — Características tecnológicas do granito Prata Interlagos.

Composição Mineralógica <sup>1</sup>	Plagioclásio (30%); quartzo (30%); microclínio (20-25%); biotita (15%); muscovita (<5%)
Massa Específica Aparente Seca <sup>2</sup>	2.625 kg/m <sup>3</sup>
Porosidade Aparente <sup>2</sup>	0,78%
Absorção de Água <sup>2</sup>	0,28%
Desgaste Amsler <sup>2</sup>	0,64 mm
Compressão Uniaxial <sup>2</sup>	179,0 MPa
Flexão <sup>2</sup>	14,1 MPa

<sup>1</sup> ROCHAS (2000).

<sup>2</sup> BORN *et al.* (1996)

**Tabela 5** — Características tecnológicas do granito Vermelho Capão Bonito. (HENNIES *et al.*, 1999).

Classificação Petrográfica	Biotita granito porfírico
Composição Mineralógica	Microclínio Pertítico (35%); plagioclásio (oligoclásio - albita) (20-25%); quartzo (30%); biotita (10%); zircão, apatita, opacos, epídoto, carbonatos, sericita (<5%)
Utilização Recomendada	Revestimentos e pavimentos internos e externos
Massa Específica Aparente Seca	2.625 kg/m <sup>3</sup>
Porosidade Aparente	0,68%
Absorção de Água	0,26%
Desgaste Amsler	0,60 mm
Impacto	51 cm
Compressão Uniaxial	133,0 MPa
Flexão	13,2 MPa
Módulo de Deformabilidade Estático	56.100 MPa
Coefficiente de Dilatação Térmica Linear	0,0087 ± 0,0002 mm/m°C

**Tabela 6** — Características tecnológicas do granito Preto Piracaia. (CARUSO, 1990).

Classificação Petrográfica	Hornblenda - biotita quartzo monzonito
Composição Mineralógica	Plagioclásio (albita - oligoclásio) (35%); biotita (25%); microclínio pertítico (20-25%); quartzo (5%); hornblenda (5%); epídoto (<5%); titanita, apatita, opacos, zircão, carbonatos, sericita (5%)
Utilização Recomendada	Revestimentos e pavimentos internos e externos
Massa Específica Aparente Seca	2.803 kg/m <sup>3</sup>
Porosidade Aparente	0,52%
Absorção de Água	0,19%
Desgaste Amsler	0,68 mm
Impacto	38 cm
Compressão Uniaxial	170,0 MPa
Flexão	17,8 MPa
Módulo de Deformabilidade Estático	32.963 MPa
Coefficiente de Dilatação Térmica Linear	0,0093 ± 0,0001 mm/m°C

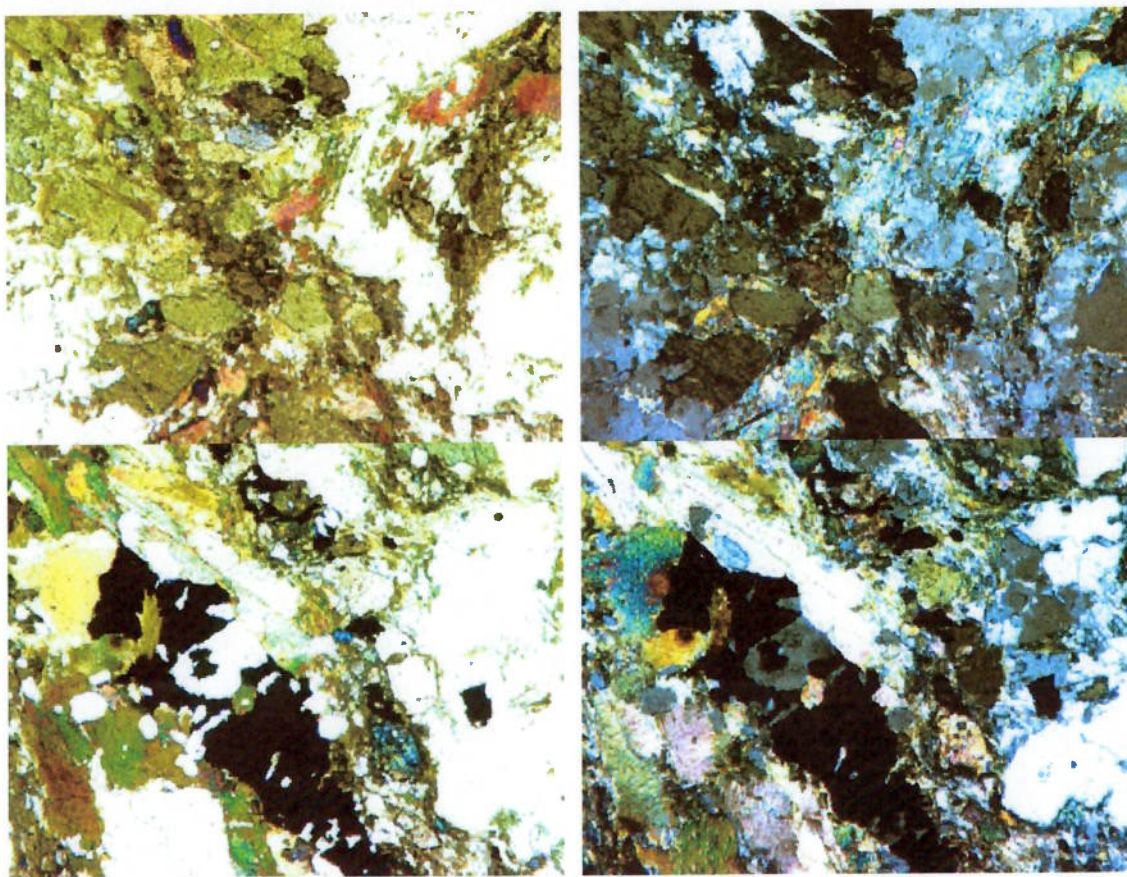
**Tabela 7** — Características tecnológicas do mármore Branco Campos do Jordão. (CARUSO, 1990).

Classificação Petrográfica	Calcita - dolomita mármore
Composição Mineralógica	Dolomita (80%); tremolita (10%); calcita (5%); olivina (<5%); serpentita, clorita magnésiana (<5%)
Utilização Recomendada	Revestimentos internos
Massa Específica Aparente Seca	2.816 kg/m <sup>3</sup>
Porosidade Aparente	0,87%
Absorção de Água	0,31%
Desgaste Amsler	3,84 mm
Impacto	22 cm
Compressão Uniaxial	77,0 MPa
Flexão	6,0 MPa
Módulo de Deformabilidade Estático	55.277 MPa
Coefficiente de Dilatação Térmica Linear	0,0112 ± 0,0005 mm/m°C

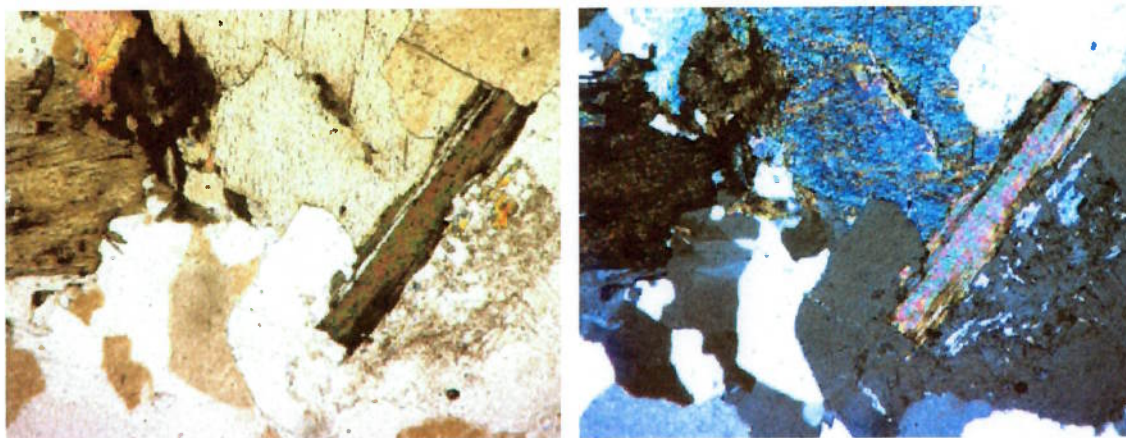
A respeito das amostras de diabásio, estas são constituídas essencialmente de 55% de feldspato plagioclásio (variedade labradorita) e 40% de piroxênio (clinoenstatita). Os 5% restantes são áreas de intercrescimento mirmequítico de quartzo e feldspato, além de constituintes acessórios, como dendritas de minério de ferro opaco e cristais em forma de agulhas de apatita.

Após a confecção de lâminas delgadas, foram obtidas, no Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da EPUSP, fotomicrografias do granito Preto Piracaiá (granulometria fina e grossa), do diabásio (granulometria fina e grossa), do mármore Branco Campos do Jordão, dos granitos Vermelho Capão Bonito e Prata Interlagos. As fotomicrografias estão reproduzidas nas figuras a seguir.



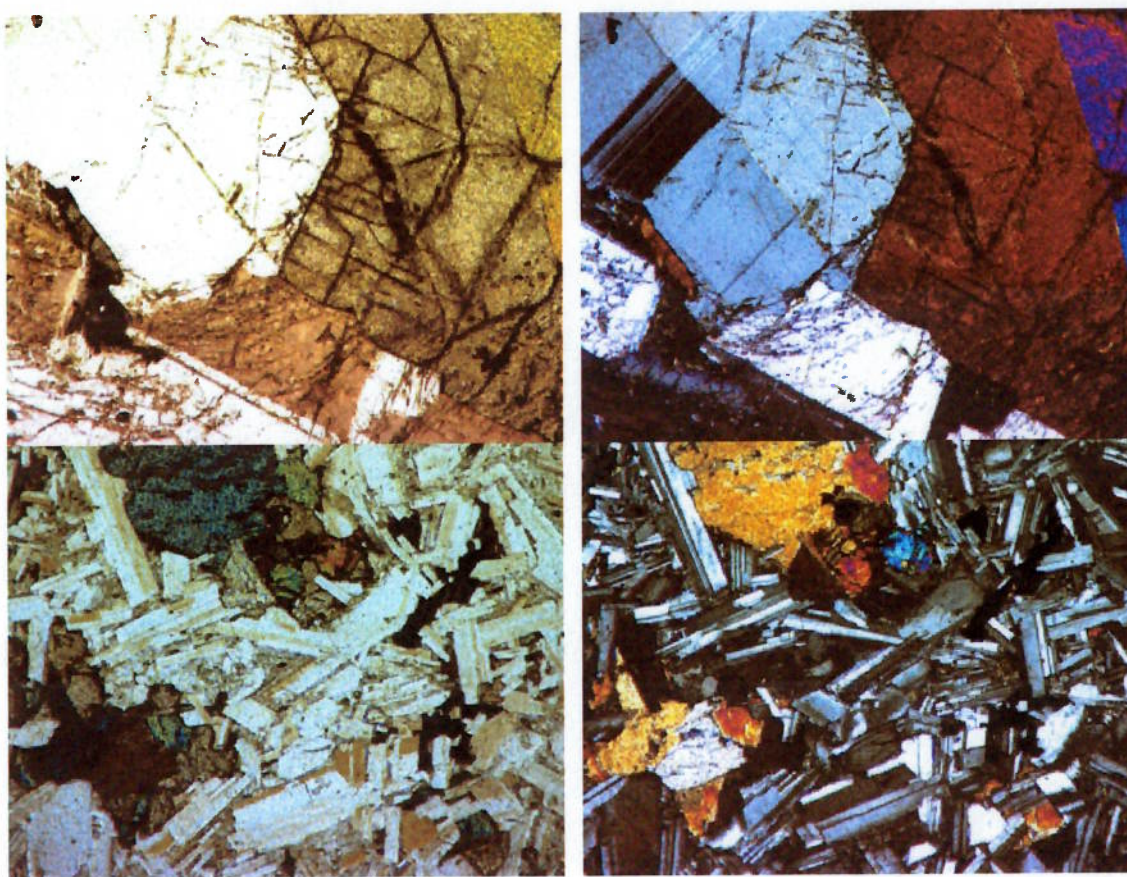


**Figura 54** — Fotomicrografias do granito Preto Piracaia. Acima, granulação fina e, abaixo, grossa. À esquerda, luz plana; à direita, nicóis cruzados. Aumento de 50 vezes.

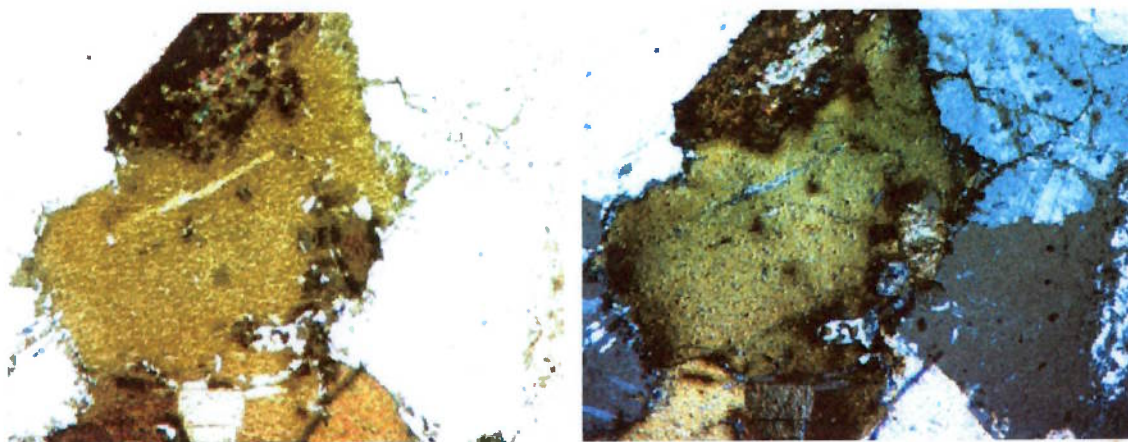


**Figura 55** — Fotomicrografias do granito Prata Interlagos. À esquerda, luz plana; à direita, nicóis cruzados. Aumento de 50 vezes.



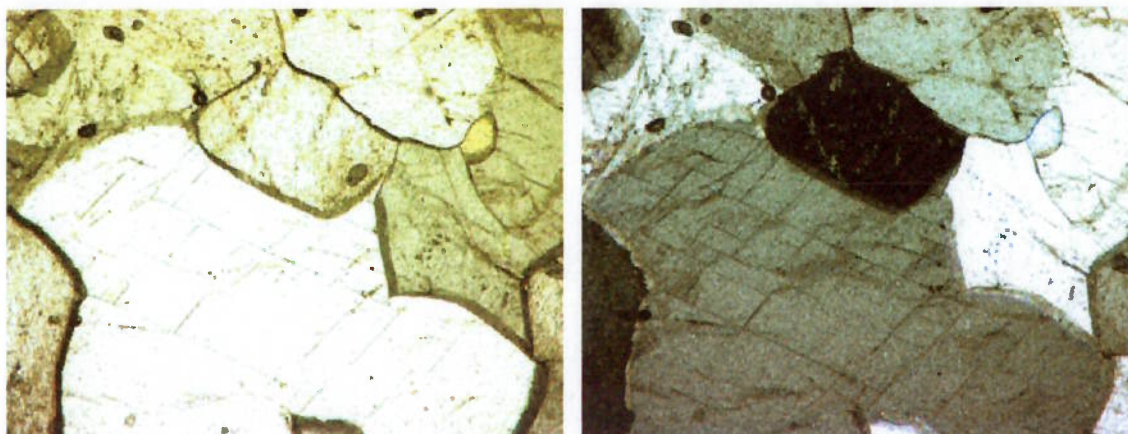


**Figura 56** — Fotomicrografias do diabásio de Campinas. À esquerda, fotos de luz plana onde os cristais incolores de plagioclásio se alternam com o clinopiroxênio castanho ou verde e algum minério opaco. À direita, com nicóis cruzados. Acima, diabásio grosso e, abaixo, diabásio “normal”. Aumento de 50 vezes.



**Figura 57** — Fotomicrografias do granito Vermelho Capão Bonito. À esquerda, luz plana; à direita, nicóis cruzados. Aumento de 50 vezes.





**Figura 58** — Fotomicrografias do mármore Branco Campos do Jordão. À esquerda, luz plana; à direita, nicóis cruzados. Aumento de 50 vezes.

Foram elaborados três corpos-de-prova cilíndricos de cada um dos materiais ensaiados, com o objetivo de submetê-los ao ensaio de velocidade de propagação de onda sísmica e também ao ensaio de resistência à compressão simples. A Tabela 8 fornece os dados da metrologia dos corpos-de-prova.

Os ensaios de velocidade de propagação de onda sísmica forneceram os resultados mostrados na Tabela 9.

Na Tabela 10 encontram-se os resultados do ensaio de resistência à compressão simples, realizados no Laboratório de Mecânica de Rochas do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da EPUSP.

Tabela 8 — Metrologia dos corpos-de-prova.

	Altura (mm)	Diâmetro médio (mm)	Relação h/d	Face 1 - eixo	Erro de planicidade (face 1)	Face 2 - eixo	Erro de planicidade (face 2)	Face 1 - Face 2
Granito Prata Interlagos (I1, I2 e I3)	138,577	53,500	2,59	53'40"	0,018	39'25"	0,019	30'03"
	138,994	53,568	2,59	56'51"	0,010	33'33"	0,010	25'44"
	138,849	53,600	2,59	29'36"	0,011	15'07"	0,012	14'20"
Granito Vermelho Capão Bonito (CB1, CB2 e CB3)	138,181	53,560	2,58	50'05"	0,014	41'50"	0,016	14'35"
	138,400	53,559	2,58	34'23"	0,011	38'55"	0,008	33,26"
	138,495	53,575	2,59	35'11"	0,007	14'14"	0,017	28'12"
Granito Preto Piracaia (granulometria "grossa": G1, G2 e G3)	134,324	53,296	2,52	18'07"	0,007	2'27"	0,005	15'60"
	134,199	53,345	2,51	20'32"	0,004	36'01"	0,007	55'45"
	133,922	53,339	2,51	24'06"	0,012	36'32"	0,015	55'25"
Granito Preto Piracaia (granulometria "fina": F1, F2 e F3)	134,493	53,348	2,52	5'50"	0,014	7'05"	0,009	13'17"
	133,643	53,323	2,50	37'08"	0,012	26'48"	0,010	3'35"
	134,001	53,348	2,51	35'10"	0,006	9'57"	0,006	38'20"
Mármore Branco Campos do Jordão (MR1, MR2 e MR3)	147,341	53,464	2,76	28'46"	0,008	21'22"	0,006	08'07"
	147,338	53,456	2,76	57'53"	0,010	48'30"	0,016	07'25"
	147,383	53,350	2,76	20'60"	0,008	04'11"	0,010	20'20"
Diabásio (D1, D2 e D3, sendo D1 de granulometria "grossa")	138,055	53,542	2,58	47'00"	0,017	32'32"	0,010	57'53"
	138,049	53,527	2,58	59'25"	0,009	47'47"	0,012	14'55"
	138,337	53,588	2,58	27'07"	0,017	17'25"	0,014	38'45"

**Tabela 9** — Velocidades de propagação de onda sísmica ( $V_p$ ) nos materiais ensaiados. Os valores em negrito representam a média aritmética da série.

	Comprimento (mm)	Período ( $\mu$ s)	$V_p$ (m/s)
Granito Prata Interlagos (I1, I2 e I3)	138,577	25,4	5.456
	138,994	25,4	5.472
	138,849	24,5	5.667
			<b>5,532</b>
Granito Vermelho Capão Bonito (CB1, CB2 e CB3)	138,181	24,3	5.686
	138,400	24,2	5.719
	138,495	24,3	5.699
			<b>5,701</b>
Granito Preto Piracaia (granulemetria “grossa”, G1, G2 e G3))	134,324	27,1	4.957
	134,199	26,6	5.045
	133,922	26,5	5.054
			<b>5,019</b>
Granito Preto Piracaia (granulometria “fina”, F1, F2 e F3)	134,493	24,5	5.490
	133,643	24,1	5.545
	134,001	24,3	5.514
			<b>5,516</b>
Mármore Branco Campos do Jordão (MR1, MR2 e MR3)	147,341	25,5	5.778
	147,338	24,0	6.139
	147,383	24,2	6.090
			<b>6,002</b>
Diabásio (D1, D2 e D3, sendo D1 de granulometria “grossa”)	138,055	23,4	5.900
	138,049	22,8	6.055
	138,337	22,3	6.203
			<b>6,129*</b>

\* Média dos valores de D2 e D3.

**Tabela 10** — Resultados do ensaio de resistência à compressão simples.

	$\sigma_c$ (MPa)	média dos $\sigma_c$ (MPa)
Granito Prata Interlagos (I1, I2 e I3)	169,84	178,93
	172,72	
	194,24	
Granito Vermelho Capão Bonito (CB1, CB2 e CB3)	141,02	140,91
	138,98	
	142,73	
Granito Preto Piracaia (granulometria “grossa”, G1, G2 e G3))	150,96	161,31
	170,28	
	162,94	
Granito Preto Piracaia (granulometria “fina”, F1, F2 e F3)	201,63	204,59
	203,42	
	208,73	
Mármore Branco Campos do Jordão (MR1, MR2 e MR3)	120,93	121,82
	118,98	
	125,56	
Diabásio (D1, D2 e D3, sendo D1 de granulometria “grossa”)	181,50	181,50
	254,85	258,03*
	261,20	

\* Média dos valores de D2 e D3.

Na Tabela 10, é interessante notar a grande diferença de resistência à compressão entre os granitos Preto Piracaia de granulometria grossa e fina, e também entre os diabásios de granulometria diferenciada. Aliás, pode-se notar a elevada resistência do diabásio de granulometria “normal” (258,03 MPa). Não é à toa que o mesmo é utilizado como agregado graúdo em concreto.

O valor de resistência do Preto Piracaia, especificado na Tabela 6 (CARUSO, 1990), é de valor próximo ao de granulometria “grossa” apresentado na Tabela 10, pois corresponde ao material retirado na antiga frente da pedreira. A amostra do granito Preto Piracaia de granulometria “fina” foi retirada de uma nova frente de lavra, aberta recentemente.

Foram apresentados, desta maneira, os materiais utilizados para o experimento de corte por jato d’água abrasivo, cujos procedimentos e resultados poderão ser apreciados no Capítulo seguinte.

## 6. TRABALHOS EXPERIMENTAIS

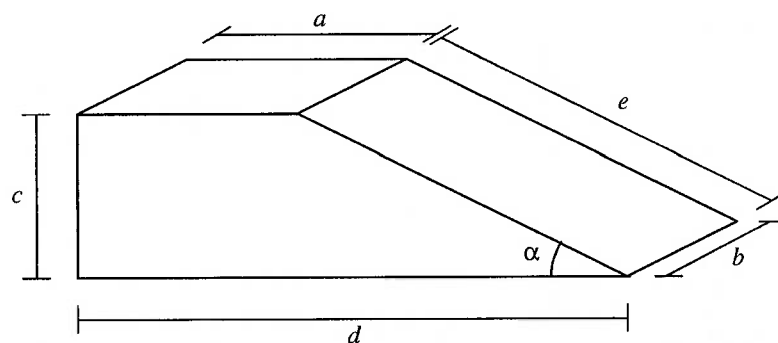
O presente Capítulo descreve os experimentos realizados no Módulo de Jato d'Água Abrasivo, localizado no Laboratório de Mecânica de Rochas do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da EPUSP. Serão apresentados o formato e as dimensões dos corpos-de-prova ensaiados\*, os parâmetros do processo de corte por jato d'água abrasivo utilizados, como pressão hidráulica, altura do bocal, diâmetro do jato, características do abrasivo utilizado e, finalmente, as cinco diferentes velocidades de bocal utilizadas para investigar a profundidade da ranhura obtida. A velocidade do bocal foi o único parâmetro do processo de corte a sofrer variação, ou seja, todos os ensaios foram realizados com a mesma pressão hidráulica, mesma altura do bocal e mesmo abrasivo. As máximas profundidades de corte obtidas em cada velocidade de bocal foram medidas e tabeladas para cada corpo-de-prova ensaiado. A partir das tabelas, foram criados gráficos para melhor visualização dos resultados.

---

\* Foram ensaiados corpos-de-prova do granito Preto Piracaia (granulometria "grossa"), granito Prata Interlagos, granito Vermelho Capão Bonito e mármore Branco Campos do Jordão. Infelizmente, devido a um defeito em uma das conexões da tubulação de alta pressão do equipamento de corte por jato d'água abrasivo, o qual provocou um insistente vazamento de água, não foi possível continuar com os ensaios. Como se trata de um sistema de tubulação de altíssima pressão (290 MPa), sua manutenção requer mão-de-obra especializada, e qualquer vazamento provoca riscos de acidentes graves ao operador. Já foi providenciada a importação de um novo trecho da tubulação de alta pressão. Desta maneira, não serão apresentados, na presente Tese, os ensaios relativos ao diabásio (granulometria "fina" e "grossa") e ao granito Preto Piracaia de granulometria "fina". Tais ensaios serão publicados assim que for possível a utilização do equipamento, o que deverá ocorrer em breve.

## 6.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

As amostras de rocha ornamental foram, inicialmente, cortadas através de disco diamantado. Para a execução dos ensaios de corte, utilizamos corpos-de-prova com o formato ilustrado na Figura 59.



**Figura 59** — Formato final dos corpos-de-prova.

O formato em cunha dos corpos-de-prova permite determinar a máxima profundidade de corte em diversas velocidades de bocal.

As dimensões dos corpos-de-prova estão apresentadas na Tabela 11.

**Tabela 11** — Dimensões dos corpos-de-prova em milímetros.

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	$\alpha$
Granito Preto Piracaia	165	112	69	250	109	39°
Granito Vermelho Capão Bonito	165	151	69	240	102	43°
Granito Prata Interlagos	138	117	69	232	117	36°
Mármore Branco Campos do Jordão	96	111	60	205	124	29°

O ângulo  $\alpha$  foi obtido através da resolução das relações trigonométricas do triângulo retângulo formado pelas medidas dos catetos *c* e (*d* - *a*)



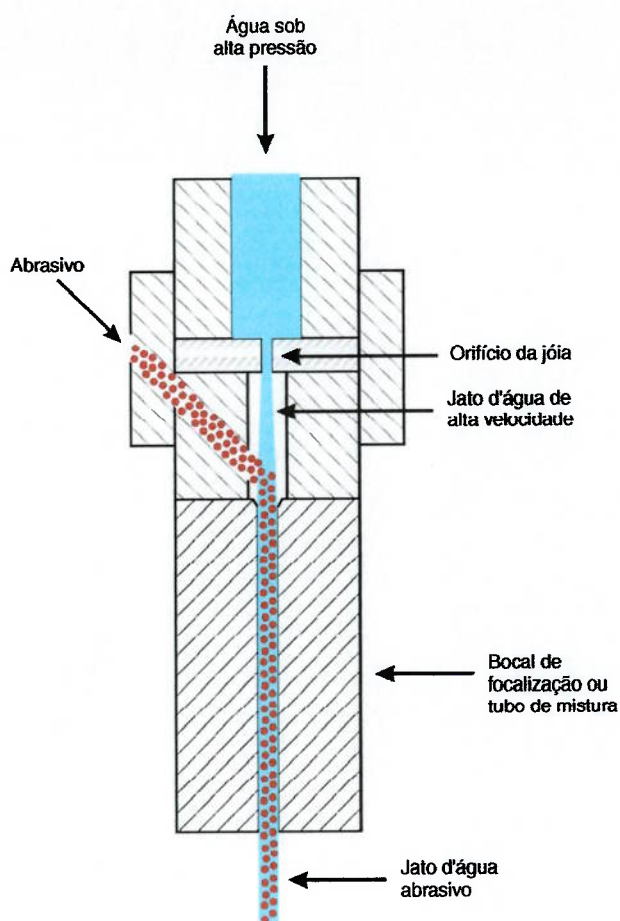
Por se tratar de material natural, coletado diretamente nas pedreiras, não foi possível a padronização de todas as amostras. As diferenças, no entanto, não trouxeram prejuízo para os resultados do experimento.

## 6.2 PARÂMETROS UTILIZADOS

O método de corte através do jato d'água abrasivo envolve uma série de parâmetros que determinam diretamente a eficiência, a economia e a qualidade das superfícies de corte. LAUAND (2001) apresenta uma descrição pormenorizada desses parâmetros, além do modo como esses influem no desempenho do processo.

Todos os ensaios foram realizados a pressão hidráulica ( $p$ ) constante de 290 MPa; o diâmetro do orifício da jóia ( $d_o$ ) é de 0,356 mm; o diâmetro do jato ( $d_f$ ), também chamado de diâmetro de foco, é de 0,762 mm, que corresponde ao diâmetro do bocal de saída do equipamento; a altura do bocal ( $x$ ), ou seja, a distância entre a saída do jato d'água abrasivo e o material a ser cortado, foi mantida constante em 3 mm, com ângulo de impacto ( $\varphi$ ) de 90°; o abrasivo utilizado foi a granada natural, de granulometria #80, com taxa de alimentação ( $\dot{m}_A$ ), ou consumo de abrasivo, de 5,5 g/s.

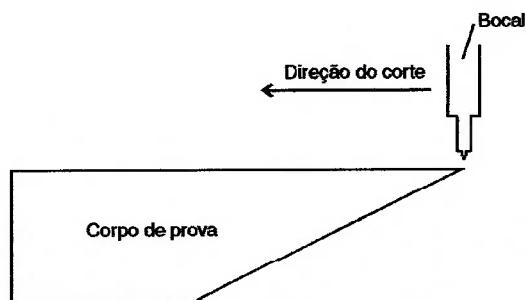
A Figura 60 mostra o esquema de funcionamento do bocal do equipamento.



**Figura 60** — Esquema mostrando o funcionamento do bocal do equipamento.

### 6.3 ENSAIOS REALIZADOS

Os corpos-de-prova foram dispostos no equipamento da maneira ilustrada na Figura 61.



**Figura 61** — Disposição dos corpos-de-prova para os ensaios de corte.

Podemos notar que o formato em cunha dos corpos-de-prova permite a análise do corte em qualquer profundidade do corpo-de-prova (ou até a profundidade máxima de corte). Em cada corpo-de-prova foram executados cinco cortes retilíneos a diferentes velocidades do bocal, com uma distância de, aproximadamente, 1,5 cm entre as ranhuras. O comprimento de cada corte foi de 18 cm.

As velocidades de bocal ( $v$ ) adotadas foram sugeridas pelo próprio *software* de controle da máquina. Este *software* calcula a velocidade do bocal (a velocidade com a qual o bocal se movimenta por sobre o material a ser cortado) levando em consideração os parâmetros do processo, a espessura do material, a qualidade de corte desejada e o número de maquinabilidade deste material. Sugerido por ZENG *et al.* (1992), o número de maquinabilidade (tradução do inglês para *machinability number*) reflete a “serrabilidade” do material, ou seja, a facilidade com que o mesmo é cortado pelo equipamento (o número de maquinabilidade do granito é 322; do mármore é 535\*). Quanto maior o número de maquinabilidade, maior a facilidade de cortá-lo, podendo-se, portanto, utilizar uma velocidade maior de bocal.

A velocidade do bocal varia, ainda, de acordo com a qualidade de corte desejada. Via de regra, quanto menor for a velocidade do bocal, maior será a qualidade, ou acabamento, da superfície cortada. Durante os ensaios, utilizamos cinco qualidades de corte diferentes para os granitos e outras cinco velocidades para o mármore. A Tabela 12, a seguir, mostra as velocidades utilizadas para o corte dos corpos-de-prova.

---

\* Valores determinados por ZENG *et al.* (1992).

**Tabela 12** — Velocidades do bocal, em mm/s, utilizadas durante os ensaio de corte.

	Mármore	Granito
Qualidade 1	6,05	3,38
Qualidade 2	3,76	2,10
Qualidade 3	2,36	1,32
Qualidade 4	1,70	0,95
Qualidade 5	1,31	0,73

A espessura do material especificada para o software, para que este determinasse as velocidades de bocal, foi de 50 mm, valor médio entre a espessura máxima de uma chapa comercial de rocha ornamental e a espessura aproximada dos corpos-de-prova ensaiados. Este valor foi utilizado tanto para o mármore quanto para o granito.

#### 6.4 RESULTADOS

Depois de submetidos ao processo de corte por jato d'água abrasivo, os corpos-de-prova foram examinados com a finalidade de se identificar os valores da máxima profundidade de corte liso, ou altura do corte liso ( $h_{liso}$ ), e da máxima profundidade de corte total ( $h$ ) que puderam ser obtidos com aquela determinada velocidade de bocal. Tais valores foram medidos diretamente nos corpos-de-prova, e estão apresentados nas Tabelas 13 a 16.

**Tabela 13** — Resultados do corte do granito Preto Piracaia.

	Qualidade 1	Qualidade 2	Qualidade 3	Qualidade 4	Qualidade 5
$v$ (mm/s)	3,38	2,10	1,32	0,95	0,73
$h_{iso}$ (mm)	19	24	32	35	44
$h$ (mm)	42	53	66	> 69,0	> 69,0

**Tabela 14** — Resultados do corte do granito Vermelho Capão Bonito.

	Qualidade 1	Qualidade 2	Qualidade 3	Qualidade 4	Qualidade 5
$v$ (mm/s)	3,38	2,10	1,32	0,95	0,73
$h_{iso}$ (mm)	18	24	28	31	36
$h$ (mm)	40	42	49	67	> 69

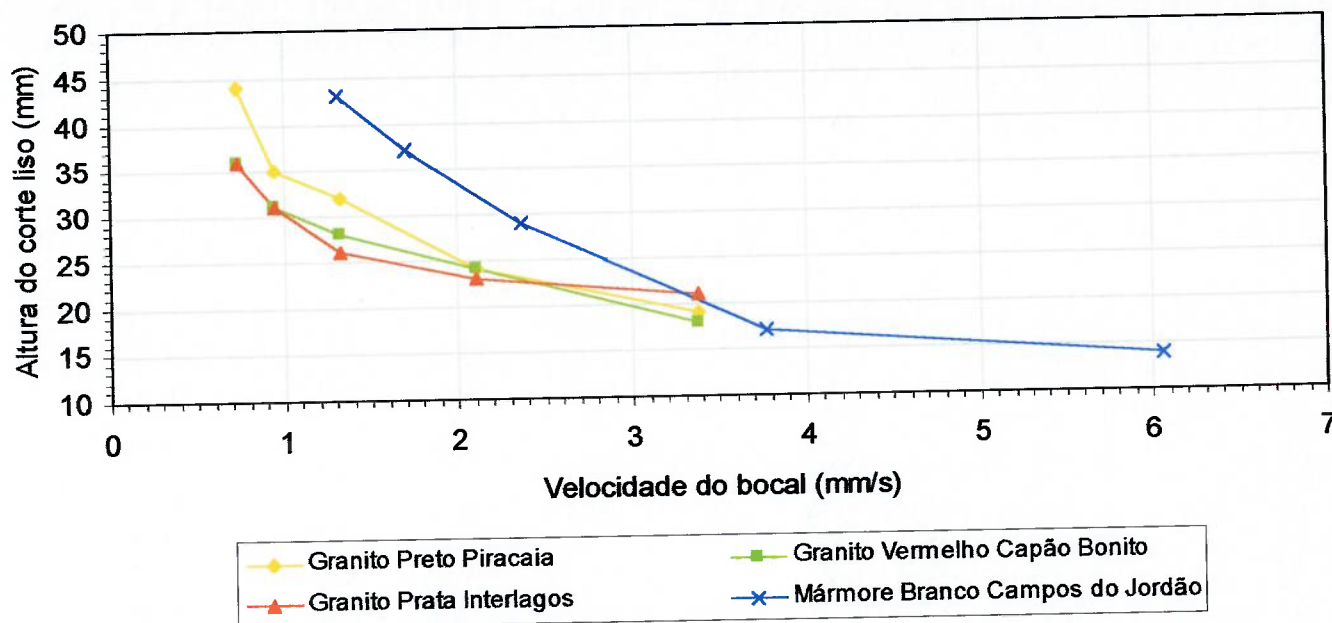
**Tabela 15** — Resultados do corte do granito Prata Interlagos.

	Qualidade 1	Qualidade 2	Qualidade 3	Qualidade 4	Qualidade 5
$v$ (mm/s)	3,38	2,10	1,32	0,95	0,73
$h_{iso}$ (mm)	21	23	26	31	36
$h$ (mm)	39	45	53	64	> 69,0

**Tabela 16** — Resultados do corte retilíneo do mármore Branco Campos do Jordão.

	Qualidade 1	Qualidade 2	Qualidade 3	Qualidade 4	Qualidade 5
$v$ (mm/s)	6,05	3,76	2,36	1,70	1,31
$h_{iso}$ (mm)	14	17	29	37	43
$h$ (mm)	36	43	54	> 60	> 60

A Figura 62, a seguir, apresenta um gráfico ilustrando a variação da profundidade do corte liso em relação à velocidade do bocal, para os materiais ensaiados.

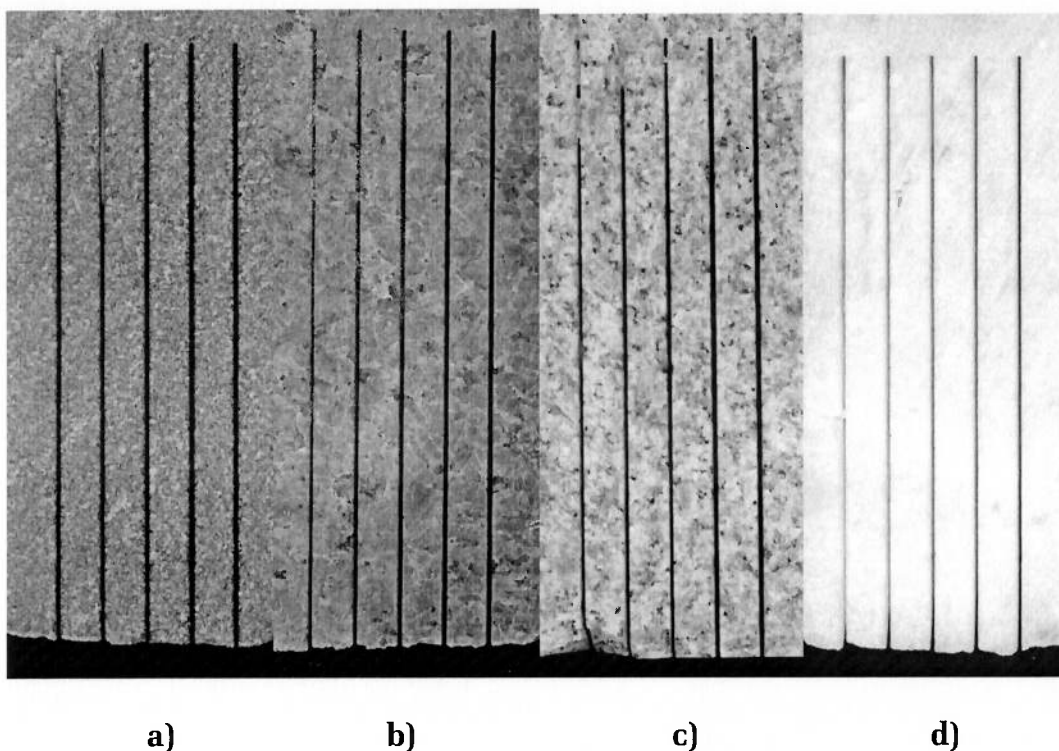


**Figura 62** — Altura do corte liso ( $h_{liso}$ ) em relação à velocidade do bocal ( $v$ ) para os materiais ensaiados.

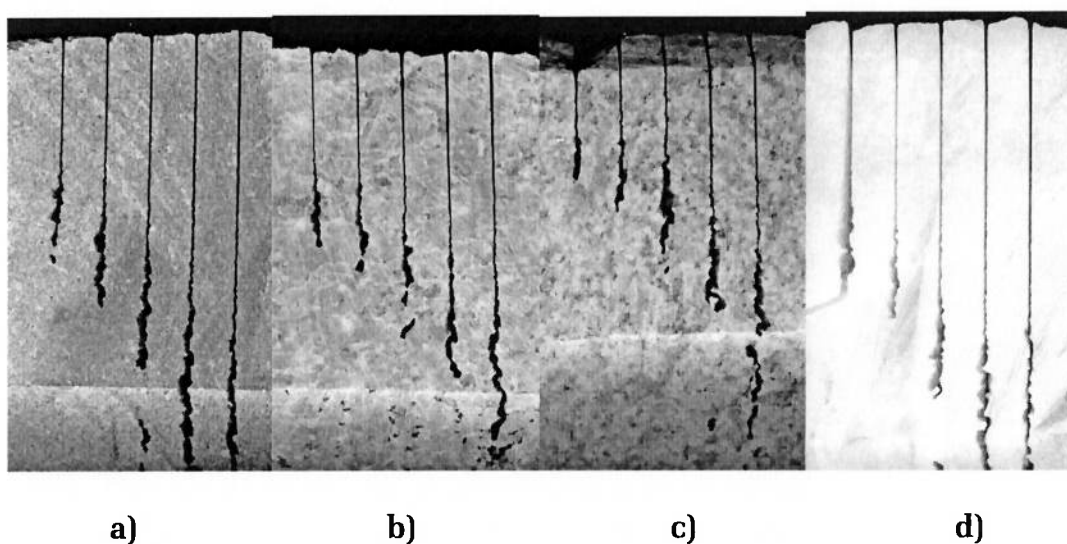
Os valores da altura do corte liso ( $h_{liso}$ ) foram medidos diretamente na rampa. Nos casos em que a profundidade de corte total superou a espessura do corpo-de-prova, ou seja, nos casos em que o jato cortou totalmente o corpo-de-prova, não foi possível a determinação do valor do corte total ( $h$ ), pois este foi limitado apenas pela espessura do corpo-de-prova. Este fato pode ser observado nas tabelas, e ocorre geralmente nas qualidades 4 e 5, pois nestas qualidades a velocidade do bocal é muito pequena, possibilitando maiores profundidades de corte.

As superfícies de entrada e de saída do jato d'água abrasivo dos corpos-de-prova foram digitalizadas. As imagens obtidas estão mostradas nas Figuras 63 e 64.





**Figura 63** — Digitalização da face superior dos corpos-de-prova:  
a) granito Preto Piracaia; b) granito Vermelho Capão Bonito;  
c) granito Prata Interlagos; d) mármore Branco Campos do Jordão.



**Figura 64** — Digitalização da rampa dos corpos-de-prova:  
a) granito Preto Piracaia; b) granito Vermelho Capão Bonito;  
c) granito Prata Interlagos; d) mármore Branco Campos do Jordão.

Na Figura 63 podemos visualizar a face de entrada do jato, assim como as ranhuras provocadas pelo mesmo. Estas ranhuras possuem largura constante em todos os corpos de prova. O valor da largura da ranhura ( $b_T$ ) é de aproximadamente 1,4 mm. Este valor depende da altura do bocal; quanto maior a altura, maior será o valor de  $b_T$ .

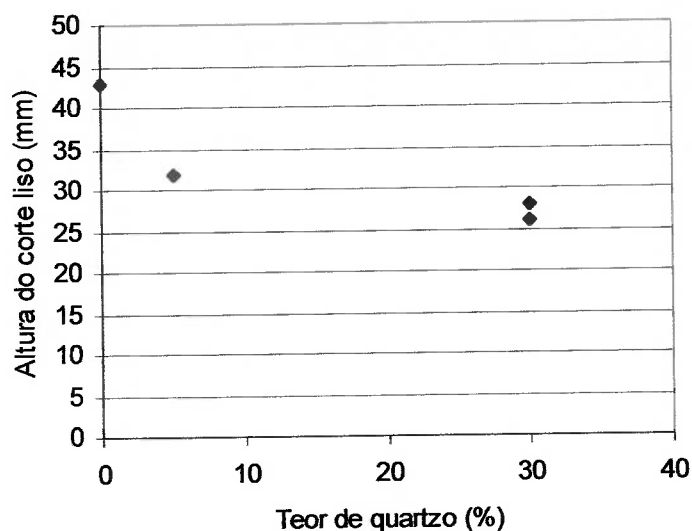
Na Figura 64 podemos observar a face de saída do jato, ou seja, a “rampa” dos corpos-de-prova. Em todos os materiais ensaiados, quanto menor a velocidade de deslocamento do bocal, maior é a profundidade de corte. Pode-se observar, em cada ranhura, duas regiões distintas de corte: a região de corte liso, caracterizada pela linha razoavelmente reta, que vai da borda do corpo-de-prova até o início da região de corte rugoso, caracterizada por uma ranhura significativamente maior e um zigue-zague do jato. Esta região representa uma instabilidade do jato, e a superfície de corte obtida é bastante rugosa. Já a região de corte liso, como o próprio nome indica, representa uma superfície de corte bastante lisa que, dependendo da aplicação da rocha ornamental, não necessita de acabamento. Em termos práticos, não é interessante cortar utilizando velocidades de bocal que fornecerão cortes rugosos.

## 6.5 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Observando o gráfico da Figura 62, nota-se que quanto menor a velocidade de deslocamento do bocal do jato d'água abrasivo, maior é a profundidade de corte obtida, para todos os materiais. De fato, o jato d'água, permanecendo mais tempo sobre o corpo-de-prova, que é o caso quando se utiliza uma baixa velocidade de bocal, consegue uma profundidade de corte maior.

A intuição nos diz, no caso dos granitos, que materiais com baixo teor de quartzo, que é o elemento mais duro na composição da rocha, apresentarão profundidades de corte maiores. Nota-se que as profundidades de corte obtidas no mármore, onde não há quartzo e os constituintes da

rochas possuem dureza Mohs relativamente pequena, são bastante superiores às obtidas nos granitos. Esta tendência pode ser verificada na região compreendida pelas velocidades de deslocamento do bocal entre 0,95 e 2,10 mm/s (qualidades 4 e 2, para os granitos). Tomando-se a velocidade de bocal em torno de 1,3 mm/s (qualidade 3 para os granitos e qualidade 5 para o mármore), o material a apresentar maior profundidade de corte (43 mm) foi o mármore (ausência de quartzo), seguido do granito Preto Piracaia (32 mm, 5% de quartzo), Vermelho Capão Bonito (28 mm, 30% de quartzo) e Prata Interlagos (26 mm, mais de 30% de quartzo). Este valores foram plotados e aparecem no gráfico da Figura 65.



**Figura 65** — Variação da altura do corte liso (mm) com o teor de quartzo (%) dos materiais ensaiados (velocidade do bocal de 1,3 mm/s).

Observa-se que a diferença entre a profundidade de corte obtida no mármore e no granito Preto Piracaia é muito maior que a diferença na profundidade de corte obtida entre o granito Preto Piracaia e o granito Vermelho Capão Bonito. De fato, os minerais que constituem o mármore possuem dureza Mohs inferior aos minerais constituintes do granito. O granito Preto Piracaia possui um teor de quartzo muito pequeno, mas é

constituído por feldspato, um mineral de dureza Mohs razoavelmente grande quando comparado com o mármore.

Em velocidades do bocal muito baixas (inferiores a 1 mm/s, ou qualidade 5 e 4 dos granitos), o granito Preto Piracaia apresentou grandes profundidades de corte, como era de se esperar; as profundidades de corte apresentadas pelos granitos Prata Interlagos e Vermelho Capão Bonito se igualaram. Em velocidades do bocal superiores a 2 mm/s, a diferença na profundidade de corte do mármore, do granito Preto Piracaia e do granito Vermelho Capão Bonito diminuiu muito. O granito Prata Interlagos apresentou uma profundidade de corte superior à do granito Preto Piracaia e mesmo superior à do mármore, o que não era de se esperar. Este fato pode ser atribuído a uma distribuição não uniforme do quartzo no corpo-de-prova; se o jato d'água abrasivo "encontra" uma região sem quartzo, essa região apresenta maior profundidade de corte. Nota-se, através do gráfico da Figura 62, que este fato ocorreu em um único ponto, equivalente à qualidade 5 do granito Prata Interlagos. Se não fosse por esse ponto, seria mantida a seqüência esperada.

Com relação ao mesmo granito, observa-se na Figura 64c, no corte de qualidade 4 (o quarto corte, da esquerda para a direita), que houve uma descontinuidade no corte: o jato já havia atingido a sua profundidade máxima e, mais adiante, na altura máxima do corpo-de-prova, reaparece, mesmo que por um orifício. É possível que o jato tenha encontrado, neste ponto, uma região com menor teor de quartzo. Descontinuidade parecida ocorreu no corpo-de-prova do granito Preto Piracaia (Figura 64a), mas a diferença de profundidade de corte não foi tão grande.

Com relação a outras propriedades das rochas, como a velocidade de propagação de onda sísmica, não foi possível estabelecer relação com as profundidades de corte obtidas pelo processo de corte por jato d'água abrasivo, a não ser que se leve em consideração apenas os granitos. Mesmo assim, a quantidade de dados é insuficiente para estabelecer uma relação.

Não foi encontrada relação entre a resistência à compressão da rocha e a profundidade de corte por jato d'água, nem mesmo entre os granitos.

Infelizmente não foi possível o ensaio do diabásio de Campinas, por motivos já expostos. Seria interessante observar a profundidade obtida neste material, pois o mesmo apresenta uma resistência à compressão muito superior à dos outros materiais ensaiados.



## 7. CONCLUSÕES

Procurou-se, através da presente tese, apresentar uma nova classificação das diversas tecnologias utilizadas para o corte de rochas ornamentais, desde as tecnologias de lavra até as utilizadas para o corte de chapas e de ladrilhos, situando as recentes tecnologias de corte por jato d'água e por jato d'água abrasivo nesta nova classificação. Uma breve descrição dos diversos processos foi apresentada, assim como a seqüência de procedimentos para o beneficiamento da rocha ornamental na indústria.

Foram comparadas as tecnologias de corte de chapas e ladrilhos de rochas ornamentais: disco diamantado e jato d'água abrasivo, destacando-se as principais diferenças, vantagens e desvantagens de cada processo.

Mostrou-se, também, que existe uma relação entre o conteúdo de quartzo da rocha e a máxima profundidade de corte que pode ser obtida pelo processo de corte por jato d'água abrasivo. Ficou evidente que os ensaios realizados devem ser repetidos em uma maior diversidade de rochas ornamentais, principalmente em granitos com teores de quartzo dentro da faixa que vai de 10 a 25%, preenchendo, desta forma, a lacuna existente no gráfico da Figura 65.

Além disso, tentou-se estabelecer uma relação entre algumas características da rocha, como a velocidade de propagação de onda sísmica e a resistência à compressão, com a profundidade de corte por jato d'água abrasivo. Dentre os materiais ensaiados, não foi possível estabelecer alguma relação.

Por fim, espera-se que a presente Tese tenha contribuído, de alguma forma, com qualquer estudo que venha a envolver o corte de rochas ornamentais, principalmente quando o método utilizado for o jato d'água abrasivo.

## REFERÊNCIAS

- AGUS, M.; BORTOLUSSI, A.; CICCUCI, R.; KIM, W.; VARGIU, A. Abrasive performance in rock cutting with AWJ and ASJ. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 8., Houston, 1995. *Proceedings*. Saint Louis: Water Jet Technology Association, 1995. v. 1, p. 31-47.
- ALENCAR, C.R.A.; CARANASSIOS, A.; CARVALHO, D.L.C. *Tecnologias de lavra e beneficiamento de rochas ornamentais*. Fortaleza: IEL, 1996.
- BORN, H.; SOARES, L.; BRAGA, J. M. Caracterização tecnológica dos materiais de construção de jazida localizada em área urbana. *EGATEA: Revista da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, p. 323-331, 1996. Número especial.
- BOSCHESI MAZUQUI, L. M. *Moldagem não convencional de corpos-de-prova de solos*. 2004. 71 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- CARUSO, L. G., coord. *Catálogo das rochas ornamentais do estado de São Paulo*. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1990.
- CHAO, J.; GESKIN, E. Experimental study of the striation formation and spectral analysis of the abrasive waterjet generated surfaces. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 7., Seattle, 1993. *Proceedings*. Saint Louis: Water Jet Technology Association, 1993. v. 1, p. 27-41.
- CICCUCI, R.; VIDAL, F.W.H. Tecnologia avançada de lavra de rochas ornamentais. In: SEMINÁRIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 1., Olinda, 1998. *Anais*. [S.l.: s.n.], 1998. p. 40-61.
- CICCUCI, R.; MANCA, P.P. Energy requirements in modern stone quarries. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL ISSUES AND WASTE MANAGEMENT IN ENERGY AND MINERAL PRODUCTION, 3., Perth, 1994. *Proceedings*. Perth: The University, [1994]. p. 111-116.
- DEKETH, H.J.R. *Wear of rock cutting tools*. Rotterdam: Balkema, 1995.

FILIPOV, M. *Aplicação de métodos computacionais no planejamento para extração de rocha ornamental em maciço rochoso*. 2002. 126 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

FUJIMURA, F.; SOARES, L.; HENNIES, W.T. Environmental issue and profitable uses of stone quarry fines. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL ISSUES AND WASTE MANAGEMENT IN ENERGY AND MINERAL PRODUCTION, 4., Cagliari, 1996. *Proceedings*. Cagliari: Digita/Universidade di Cagliari, 1996. v. 2, p. 959-966.

FUJIMURA, F.; STELLIN JUNIOR, A. *Tecnologia de corte de rocha ornamental com fio helicoidal*. São Paulo: EPUSP, 2001. 10 p. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Minas, BT / PMI / 129).

HASHISH, M. Abrasive jets. In: LABUS, T. J., ed. *Fluid jet technology: fundamentals and application*. 4. ed. Saint Louis: Water Jet Technology Association, 1999. Section 4.0, p. 4.1-2.52.

HENNIES, W.T.; STELLIN JÚNIOR., A.; CRETELLI, C. Jet piercing application for red granite block mining in São Paulo, Brazil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MINE PLANNING AND EQUIPMENT SELECTION, 8., Dnipropetrovsk, 1999. *Proceedings*. Dnipropetrovsk: National Mining University of Ukraine, 1999. p. 21-26.

HENNIES, W.T.; LAUAND, C.T.; MARTÍN CORTÉS, G.R.; DIAZ, F.V. Otimização do corte de polipropileno com jato abrasivo. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, São Paulo, v. 14, n. 3, p. 161-189, 2004.

HENNIES, W.T.; LAUAND, C.T.; MARTÍN CORTÉS, G.R. *Jato de água abrasivo para corte e gravação de materiais friáveis*. São Paulo: EPUSP, 2002. 18 p. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Minas, BT/PMI/157).

HENNIES, W.T.; SOARES, L.; MARTÍN CORTÉS, G.R.; LAUAND, C.T.; FINKIE, R. Aproveitamento de rejeitos do processamento de areia monazítica In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL: MATERIAIS RECICLADOS E SUAS APLICAÇÕES, 4., São Paulo, 2001. *Anais*. São Paulo: IBRACON, 2001. p. 353-363.

JAEGER, J.C.; COOK, N.G.W. *Fundamentals of rock mechanics*. 3. ed. London: Chapman and Hall, 1984.

KALUMUCK, K.M.; CHAHINE, G.L.; FREDERICK, G.S. The influence of ambient pressure and nozzle shape on submerged water jet velocity and spreading. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 7., Seattle, 1993. *Proceedings*. Saint Louis: Water Jet Technology Association, 1993. v. 1, p. 251-262.

LAUAND, C. T. *Contribuição ao estudo do corte de rochas por jato d'água abrasivo*. 2001. 106 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

LAUAND, C.T.; MARTÍN CORTÉS, G.R.; HENNIES, W.T. Jato d'água abrasivo para corte de ladrilhos cerâmicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 46., São Paulo, 2002. *Anais*. São Paulo: Associação Brasileira Cerâmica, 2002. 13 p. 1 CD-ROM.

LAUAND, C.T.; MARTÍN CORTÉS, G.R.; HENNIES, W.T.; FERREIRA, L.C. Uso de abrasivo artificial para corte de granitos. In: REUNIÃO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO IBERO-AMERICANA DE ENSINO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE MINAS, 12.; SEMANA IBERO-AMERICANA DE ENGENHARIA DE MINAS, 1.; SIMPÓSIO IBERO-AMERICANO DE ENGENHARIA DE MINAS, 1.; WORKSHOP EM RISCOS GEODINÂMICOS, 1., São Paulo, 2004. *Trabalhos apresentados*. São Paulo: EPUSP, 2004. p. 61-66.

LAUAND, V. H. *Gravação de rochas ornamentais por jato d'água abrasivo*. 2004. 92 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

MARTÍN CORTÉS, G.R. *Métodos de corte de rochas com jato de água abrasivo*. 2003. 132 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

MARTÍN CORTÉS, G.R.; SANTOS, R.B.; HENNIES, W.T.; VALENZUELA DIAZ, F.R.; LAUAND, C.T. Recuperação de granada utilizada em jato de água abrasivo de ultra alta pressão. In: FÓRUM DAS UNIVERSIDADES PÚBLICAS PAULISTAS, CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM RESÍDUOS, 1., São Pedro, 2003. *Anais*. São Pedro: USP/UNICAMP/UNESP/UFSCar/IPT/IPEN, 2003. Trab. 137.

MARTINEC, P.; FOLDYNA, J.; SITEK, L.; BILKOVÁ, L.; BARCOVÁ, K. Olivine as industrial abrasive for high speed water jet technology. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 16., Aix-en-Provence, 2002. *Proceedings*. Bedfordshire: BHR Group Limited, 2002. p. 287-297.

- MAURER, W.C. *Novel drilling techniques*. Oxford: Pergmon Press, 1968.
- MOMBER, A. *Waterjet applications in construction engineering*. Rotterdam: A.A. Balkema, 1998.
- MOMBER, A.W.; KOVACEVIC, R. *Principles of abrasive water jet machining*. Londres: Springer-Verlag, 1998.
- NIU, M.; FUKUNISHI, Y.; KOBAYASHI, R. Experimental and numerical studies on the mechanism of abrasive jet cutting. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 9., Dearborn, 1997. *Proceedings*. Saint Louis: Water Jet Technology Association, 1997 v. 1, p. 145-156.
- PISSATO, E.; SOARES, L. Adição de finos de pedra em misturas de solo-cimento. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL: MATERIAIS RECICLADOS E SUAS APLICAÇÕES, 4., São Paulo, 2001. *Anais*. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto., 2001. p. 331-339.
- POU, J.; TRILLO, C.; SOTO, R.; DOVAL, A.F.; BOUTINTUIZA, M.; LUSQUINOS, F.; QUINTERO, F.; AMOR, M.P. Laser blasting - a new method for surface treatment of dimension stones. *Key Engineering Materials*, Aedermannsdorf, v. 250, p. 247-252, 2003.
- RADIJKO, B.V. Empirico-analytical investigations of coal seams braking process with plain water jets. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 8; Houston, 1995. *Proceedings*. Saint Louis: Water Jet Technology Association, 1995. v. 2, p. 867-878.
- RESENDE SILVA, M.A. *Contribuição ao estudo da cominuição inicial à partir da malha de perfuração*. 1994. 135 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.
- ROCHAS ornamentais e de revestimento do estado de São Paulo. São Paulo: IPT, 2000. (Publicação IPT, 2651). 1 CD-ROM.
- ROTONDARO, R. *Mecanismos de desgaste abrasivo*. 1989. 132 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

STELLIN, M.R.M. *Planejamento de serragem de rochas ornamentais*. 2003. 63 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

STELLIN JÚNIOR, A. *Serragens de granitos para fins ornamentais*. São Paulo: EPUSP, 1998. 37 p. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Minas, PMI/BT/085).

STELLIN JÚNIOR, A.; CARANASSIOS, A. Extração de rochas ornamentais. *Brasil Mineral*, São Paulo, n. 89, p. 30-34, jun. 1991.

STELLIN JÚNIOR, A.; HENNIES, W.T.; LAUAND, V.H. Gravação de rochas com jato d'água abrasivo. In: REUNIÃO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO IBERO-AMERICANA DE ENSINO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE MINAS, 12.; SEMANA IBERO-AMERICANA DE ENGENHARIA DE MINAS, 1.; SIMPÓSIO IBERO-AMERICANO DE ENGENHARIA DE MINAS, 1.; WORKSHOP EM RISCOS GEODINÂMICOS, 1., São Paulo, 2004. *Trabalhos apresentados*. São Paulo: EPUSP, 2004. p. 73-80.

SKIKSZAY, M.; TEISSEDRE, J. M. Fontes de Campos do Jordão. *Boletim IG*. Instituto de Geociências, São Paulo, v. 10, p. 1-10, 1979.

VIDAL, F.W.H.; STELLIN JÚNIOR, A. *Estudo dos elementos abrasivos de fios diamantados para a lavra de granitos do Ceará*. São Paulo: EPUSP, 1999. 57 p. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Minas, BT/PMI/097).

VIJAY, M.M. Fluid mechanics of jets. In: LABUS, T.J.(Ed.). *Fluid jet technology: fundamentals and application*. 4. ed. Saint Louis: Water Jet Technology Association, 1999. Section 2.0, p. 2.1-2.41.

VIJAY, M.M.; HU, S.G.; LAI, M.K.Y. Enhancing the performance of cavitating water jets. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 7., Seattle, 1993. *Proceedings*. Saint Louis: Water Jet Technology Association, 1993. v. 1, p. 233-250.

WYATT, P.F.; PETERSON, M.C. Development of water jet cutting in extremely hard granite quarries 10 to 20 feet deep. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 9., Dearborn, 1997. *Proceedings*. Saint Louis: Water Jet Technology Association, 1997. v. 2, p. 485-496.



ZENG, J.; KIM, T.J. An erosion model of polycrystalline ceramics in abrasive waterjet cutting. *Wear*, Amsterdam, n. 193, p. 207-217, 1996.

ZENG, J.; KIM, T. J.; WALLACE, R. J. Quantitative evaluation of machinability in abrasive waterjet machining. *PED*, v. 58, p. 169-79, 1992.