

GUILLERMO RUPERTO MARTÍN CORTÉS

**MÉTODOS DE CORTE DE ROCHAS COM JATO  
DE ÁGUA ABRASIVO**

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

SÃO PAULO  
2003

OK

GUILLERMO RUPERTO MARTÍN CORTÉS

**MÉTODOS DE CORTE DE ROCHAS COM JATO  
DE ÁGUA ABRASIVO**

Tese apresentada a 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  
2003

A minha mãe em seus oitenta e quatro, a  
minha esposa amada e meus filhos.

## AGRADECIMENTOS

Ao Brasil, e à USP – Universidade de São Paulo por amparar nossa pesquisa.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Wildor Theodoro Hennies por me motivar e encorajar a efetuar este trabalho de doutoramento. E também pela paciência.

À FAPESP – Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo - pelo total apoio material e financeiro à pesquisa.

Aos Professores do PMI – EPUSP – Depto. Eng de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo: Lineu Azuaga Ayres da Silva, Henrique Khan, Helmutt Born, Antônio Stellin, Arthur Pinto Chavez, Lindolfo Suarez, Fernando Fujimura, Sergio Médiçi de Eston, e Homero Delboni pelo apoio a nossa pesquisa e por contribuir com os recursos dos laboratórios que dirigem à realização desta pesquisa.

Ao Prof. Raimondo Ciccu e colegas do DIGITA-UC – Dipartamenti di Geoingegneria e Tecnologia Ambientali da Università di Cagliari pelo assessoramento, e pela atenção, colaboração e afeto.

A Mr.Laird Parry e seus colegas da OMAX Co., Seattle pela atenção e colaboração constantes durante toda a pesquisa.

Aos Professores do LMP – Sol Laboratório de Matérias Primas Particuladas e Sólidos não metálicos do PMT – EPUSP – Depto. Eng. Metalúrgica e de Materiais da EPUSP Francisco Valenzuela Diaz, e Hélio Wiebeck pelo apoio, iniciativa, participação e colaboração com alunos de Iniciação Científica, nas pesquisas de corte de materiais poliméricos.

A Maria Cristina Martinez Bonesio pelas indicações com a bibliografia.

A Jorge Sakamoto pela colaboração na preparação dos corpos de prova e nos trabalhos de laboratório.

A meus companheiros pós-graduandos do GPJAE pela amizade e colaboração nos trabalhos da pesquisa.

Aos meus companheiros cubanos pós-graduandos do PMI - EPUSP pelo apoio moral e científico à realização desta pesquisa.

Às Professoras de Língua Portuguesa, Professora Márcia da Costa Vieira e Professora Ana Cristina Feola Pereira, pela revisão e correção da redação desta Tese.

A minha esposa e família que me ofereceram seu apoio espiritual e material desde os inícios da pesquisa.

A todas aquelas pessoas que de uma forma ou de outra contribuíram à feliz conclusão desta Tese.

**A DEUS, POR PROVIDENCIAR E PERMITIR TUDO ISSO.**

São Paulo, Maio de 2003.

## RESUMO

Avançada tecnologia para corte de materiais duros, baseada em jato d'água pressurizada e misturada com abrasivo particulado, foi aplicada ao corte de rochas. A tecnologia denominada jato d'água abrasivo de ultra-alta pressão é aplicada por equipamento adquirido nos Estados Unidos e instalado no Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. As rochas escolhidas para o trabalho são granitos e mármore brasileiros. Os corpos de prova foram configurados com espessuras entre 69 mm e 140 mm e o corte foi feito pelos métodos de um único passo e o de passos múltiplos. Foi estudado o efeito do jato nos diferentes grãos minerais e avaliada qualidade final das paredes de corte. Finalmente, é determinado o custo das operações de corte de rochas brasileiras com o jato d'água abrasivo de ultra-alta pressão nos diferentes tipos petrográficos ensaiados e são dadas conclusões do trabalho.

## **ABSTRACT**

Advanced technology to cut heavy-duty hard materials, based on jet of high-pressurized water mixed with abrasive, was applied to cut rocks. The technology, denominated ultra-high pressure abrasive water jet was applied by equipment acquired in the United States and it is installed in the Mining and Petroleum Engineering Department, of the Polytechnic School at the University of São Paulo. The chosen rocks for the research are Brazilian granites and marble. The samples were configured with thickness between 69 mm and 140 mm and the cut was done by both, the single pass and the multiple pass methods. It is studied the effect of the jet in the different grain minerals and evaluated the final quality of the cutted walls. Finally, it is determined the operating cost of the cutting operations of the brazilians rocks with the ultra-high pressure abrasive water jet in the different petrographic types and are given the work conclusions.

# MÉTODOS DE CORTE DE ROCHAS COM JATO DE ÁGUA ABRASIVO

Doutorando: Mestre Eng. Guillermo Ruperto Martin Cortes

Orientador: Prof. Dr. Wildor Theodoro Hennies

## ERRATA

PÁGINA	LINHA	ONDE SE LÊ	LEIA-SE
75	Fig. 44	Mármore branco Campos de Jordão	Mármore branco Mantiqueira
84	Fig. 57	Mármore branco Campos de Jordão	Mármore branco Mantiqueira
84	Fig. 58	Mármore branco Campos de Jordão	Mármore branco Mantiqueira
85	Fig. 59	Mármore branco Campos de Jordão	Mármore branco Mantiqueira
85	Fig. 60	Mármore branco Campos de Jordão	Mármore branco Mantiqueira
113	Fig. 87	Np = 64	Np = 32

São Paulo, Maio de 2003

## SUMÁRIO

	Pág.
1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
1.1 Histórico do desenvolvimento da pesquisa sobre jato d'água no Brasil	1
1.2 Ordenação do conteúdo dos estudos	4
1.3 Objetivos da Tese	6
2 GENERALIDADES E REVISÃO DA LITERATURA	7
2.1 Histórico	7
2.1.1 Apresentação e generalidades	7
2.1.2 Evolução histórica e aplicações dos jatos d'água	9
2.2 Classificação, aplicações e métodos de corte com jatos de água.	17
2.3 Jatos d'água no corte de rochas.	20
3 MATERIAL E MÉTODOS	32
3.1 Rochas utilizadas na pesquisa	32
3.2 Equipamento de Jato d'água abrasivo de ultra-alta pressão do PMI-EPUSP	35
3.3 Descrição do módulo OMAX 2652A	37
3.4 O processo de criação da peça	40
3.5 Preparo de corpos de prova	42
3.6 Parâmetros do processo de corte por jato de água abrasivo	43
3.7 Ensaio de corte	46
3.8 Métodos de avaliação do acabamento da superfície	57
3.8.1 Avaliação do afunilamento do corte	57
3.8.2 Altura do corte liso (h liso), e altura do corte total (h)	58
3.8.3 Medidas de rugosidade	59

3.8.4	Estudo do comportamento dos grãos minerais diante do jato abrasivo	66
3.8.5	Análise dos custos das operações de corte de rochas com o jato d'água abrasivo	67
4	RESULTADOS E INTERPRETAÇÃO	68
4.1	Afunilamento do corte	68
4.2	Altura do corte liso ( $h_{\text{liso}}$ ), e altura do corte total ( $h$ ).	76
4.3	Relação entre $h_{\text{liso}}$ e $h$ total com o consumo de abrasivo	86
4.4	Avaliação da qualidade (rugosidade) do corte	97
4.5	Estudo do comportamento dos grãos minerais diante do jato abrasivo	106
4.6	Custos das operações de corte de rochas com o jato d'água abrasivo	114
5	CONCLUSÕES	121
	LISTA DE REFERÊNCIAS	124
	Apêndice A: GLOSSÁRIO	

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Lavra hidráulica a céu aberto por jato d'água no século XIX	9
Figura 2	Lavra hidráulica na pedreira da Viterbo Machado Luz Mineração Ltda.	10
Figura 3	Corte de ranhuras em lavra de granito	11
Figura 4	Corte de fendas na face de um túnel em arenito	12
Figura 5	Lavra de jazida de fosfatos na Flórida por furo de sonda	13
Figura 6	Trabalhos no espelho	15
Figura 7	Classificação dos jatos de água modificada pelo autor desta tese	17
Figura 8	Esquema geológico do Estado de São Paulo e localização das pedreiras	33
Figura 9	Granito vermelho Capão Bonito	34
Figura 10	Granito preto Piracaia	34
Figura 11	Granito prata Interlagos	34
Figura 12	Mármore branco Mantiqueira	34
Figura 13	Local do laboratório de jato abrasivo	36
Figura 14	Corte de bocal de jato abrasivo e do material alvo	39
Figura 15	Etapas principais na criação de uma peça no jato abrasivo da OMAX	40
Figura 16	Formato final dos corpos de prova	43
Figura 17	Disposição dos corpos de prova para ensaio de corte retilíneo	46
Figura 18	Esquema das principais combinações de V/Np em mármore	48
Figura 19	Curva da relação V/Np para o ensaio 5 em mármore MBCJ	49
Figura 20	Curva da relação V(fixas)/Np(variáveis) para o ensaio 6 em mármore MBCJ	49

Figura 21	Esquema das principais combinações de V/Np em granitos	50
Figura 22	Curva da relação V/Np para os ensaios 1, 3, 4 em granitos	50
Figura 23	Curva da relação V(fixas)/Np(variáveis) para os ensaios 2, 7, 8, 9 também em granitos.	51
Figura 24	Afunilamento convergente do sulco	58
Figura 25	Alturas de corte liso e rugoso no sulco	59
Figura 26	Perthometro S3P	59
Figura 27	Detalhe do estilete medindo GPP	59
Figura 28	Curva Abbot – Firestone e expressão da Proporção material	60
Figura 29	Ry, Rp, Rm	61
Figura 30	Rk, Rpk, Mr <sub>1</sub> , Mr <sub>2</sub>	61
Figura 31	Sm	62
Figura 32	Profundidade do perfil	63
Figura 33	Profundidade da rugosidade	64
Figura 34	W-perfil (perfil de ondulação)	64
Figura 35	Ra, Rq Rugosidade média	65
Figura 36	Esquema dos corpos de prova triangular e da disposição dos perfis avaliados no Perthometro S3P.	66
Figura 37	Sulcos de entrada e saída do jato abrasivo no Corpo de prova No 1 GPP.	68
Figura 38	Grau de afunilamento nas linhas de corte em GPP	69
Figura 39	Sulcos de entrada e saída do jato abrasivo no Corpo de prova No 1 GVCB.	70
Figura 40	Grão de afunilamento nas linhas de corte em GVCB	71
Figura 41	Sulcos de entrada e saída do jato abrasivo no Corpo de prova No 1 GPI.	72

Figura 42	Grão de afunilamento nas linhas de corte em GPI.	73
Figura 43	Sulcos de entrada e saída do jato abrasivo no Corpo de prova No 1 MBCJ.	74
Figura 44	Grão de afunilamento nas linhas de corte em MBCJ	75
Figura 45	Altura do corte liso segundo Np por V para GPP.	77
Figura 46	Altura do corte liso segundo V por Np para GPP.	77
Figura 47	Altura do corte total segundo Np por V para GPP.	78
Figura 48	Altura do corte total segundo V por Np para GPP	78
Figura 49	Altura do corte liso segundo Np por V para GVCB.	79
Figura 50	Altura do corte liso segundo V por Np para GVCB.	79
Figura 51	Altura do corte total segundo Np por V para GVCB.	80
Figura 52	Altura do corte total segundo V por Np para GVCB.	80
Figura 53	Altura do corte liso segundo Np por V para GPI.	81
Figura 54	Altura do corte liso segundo V por Np para GPI.	81
Figura 55	Altura do corte total segundo Np por V para GPI.	82
Figura 56	Altura do corte total segundo V por Np para GPI.	82
Figura 57	Altura do corte liso segundo Np por V para MBCJ.	84
Figura 58	Altura do corte liso segundo V por Np em MBCJ.	84
Figura 59	Altura do corte total segundo Np por V para MBCJ	85
Figura 60	Altura do corte total segundo V por Np para MBCJ	85
Figura 61	Relação entre h liso e h total com o abrasivo consumido no GPP	86
Figura 62	Relação entre h liso e h total com o abrasivo consumido no GVCB.	87
Figura 63	Relação entre h liso e h total com o abrasivo consumido no GPI	88
Figura 64	Relação entre h liso e h total com o abrasivo consumido no MBCJ.	89

Figura 65	Granito preto Piracaia. Aumento do consumo específico de abrasivo com o aumento do número de passos, por velocidade do bocal aplicada.	92
Figura 66	Granito preto Piracaia. Diminuição do consumo específico de abrasivo com aumento da velocidade do bocal, segundo o número de passos aplicado.	92
Figura 67	Granito vermelho Capão Bonito. Aumento do consumo específico de abrasivo segundo aumenta o número de passos, por velocidade do bocal aplicada.	93
Figura 68	Granito vermelho Capão Bonito. Diminuição do consumo específico de abrasivo com aumento da velocidade do bocal, segundo o número de passos aplicado.	93
Figura 69	Granito prata Interlagos. Aumento do consumo específico de abrasivo segundo aumenta o número de passos, por velocidade do bocal aplicada.	94
Figura 70	Granito prata Interlagos. Diminuição do consumo específico de abrasivo com aumento da velocidade do bocal, segundo o número de passos aplicado.	94
Figura 71	Mármore branco Mantiqueira. Aumento do consumo específico de abrasivo segundo aumenta o número de passos, por velocidade do bocal aplicada.	96
Figura 72	Mármore branco Mantiqueira. Diminuição do consumo específico de abrasivo com aumento da velocidade do bocal, segundo o número de passos aplicado.	96
Figura 73	Indicadores de rugosidade em Granito preto Piracaia.	99
Figura 74	Indicadores de rugosidade, em Granito vermelho Capão Bonito.	101
Figura 75	Indicadores de rugosidade em Granito prata Interlagos	103
Figura 76	Indicadores de rugosidade em Mármore branco Mantiqueira.	105

Figura 77	GPP. Área gerada pelo jato abrasivo na combinação V/Np mais lenta.	106
Figura 78	GPP. Área gerada pelo jato abrasivo em combinação V/Np ainda lenta.	107
Figura 79	Superfícies geradas pelo jato abrasivo em combinações distantes entre si.	108
Figura 80	Superfície gerada pelo jato abrasivo em GVCB (1)	108
Figura 81	Superfície gerada pelo jato abrasivo em GVCB (2)	109
Figura 82	Superfície gerada pelo jato abrasivo em GVCB (3)	109
Figura 83	Superfície gerada pelo jato abrasivo em GVCB (4)	109
Figura 84	Corte em Granito prata Interlagos	111
Figura 85	Detalhamento de seção de superfície de corte em GPI.	111
Figura 86	Superfície criada no mármore pelo jato abrasivo na combinação mais lenta.	112
Figura 87	Superfície criada no mármore pelo jato abrasivo na combinação mais rápida.	113
Figura 88	Taxa de corte e custos relacionados aos parâmetros de corte em GPP.	118
Figura 89	Taxa de corte e custos relacionados aos parâmetros de corte em GVCB.	119
Figura 90	Taxa de corte e custos relacionados aos parâmetros de corte em GPI.	119
Figura 91	Taxa de corte e custos relacionados aos parâmetros de corte em MBCJ.	120
	Figuras do apêndice A	
Figura		1
A-1		

Figura A-2	4
Figura A-3	6
Figura A-4	9
Figura A-5	11

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Alguns exemplos de lavra hidráulica a céu aberto	10
Tabela 2	Outros usos dos jatos de água, na lavra a céu aberto.	10
Tabela 3	Feições de equipamentos de significado industrial, testados no campo.	11
Tabela 4	Algumas aplicações de jatos de água em lavra subterrânea	12
Tabela 5	Estimativa de custo de corte de cerâmica por jato d'água abrasivo	25
Tabela 6	Rochas utilizadas. Petrografia e mineralogia	32
Tabela 7	Caracterização das rochas utilizadas	34
Tabela 8	Ensaio e dimensões dos corpos de prova (em mm e graus)	43
Tabela 9	Parâmetros do processo e simbologia	44
Tabela 10	Ensaio Número 1. Granito preto Piracaia. CP 1	51
Tabela 11	Ensaio Número 2. Granito vermelho Capão Bonito CP1.	52
Tabela 12	Ensaio Número 3. Granito preto Piracaia CP2	52
Tabela 13	Ensaio Número 4. Granito prata Interlagos CP-1	52
Tabela 14	Ensaio Número 5. Mármore branco Mantiqueira CP-1	53
Tabela 15	Ensaio Número 6. Mármore branco Mantiqueira CP-2. Velocidades fixas e número de passos variável.	53
Tabela 16	Ensaio Número 7. Granito preto Piracaia CP-2 e CP-3. Velocidades fixas e número de passos variável.	54
Tabela 17	Ensaio Número 8. Granito prata Interlagos CP-2. Velocidades fixas e número de passos variável.	55
Tabela 18	Ensaio Número 9. Granito vermelho Capão Bonito CP-2 e CP-3. Velocidades fixas e número de passos variável.	56
Tabela 19	Limites de medição do Perthometro S3P	60
Tabela 20	Largura dos sulcos na entrada e na saída do jato em GPP.	68
Tabela 21	Relação entrada / saída para determinar o grau de afunilamento em	69

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASJC	Jato de água abrasivo de duas fases (em suspensão ou pré-misturado)
AWJC	Jato de água abrasivo de três fases
CAD	Desenho assistido por computação (do Inglês)
ELFUSA	Geral de Eletrofusão Ltda.
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.
ICAM	“Indústria Conformadora de Artículos de Metal”, São Carlos, SP.
IKK	IKK do Brasil, Indústria e Comércio Ltda.
GPJAE	Grupo de pesquisa de jatos de água na engenharia
GPI	Granito prata Interlagos
GPP	Granito preto Piracaia
GVCB	Granito vermelho Capão Bonito
LCT	Laboratório de Caracterização Tecnológica de Minérios do PMI-EPUSP
LMR	Laboratório de Mecânica de Rochas do PMI – EPUSP
MBCJ	Mármore branco Mantiqueira
NUCLEBRAS	Empresas Nucleares do Brasil. S.A.
NUCLEMON	Divisão da NUCLEBRAS para a lavra e beneficiamento das areias monazíticas do Norte do Estado de Rio de Janeiro
PMI – EPUSP	Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
PRAXAIR	PRAXAIR, Inc. Empresa transnacional fundada em 1907, integrada por mais de 500 companhias especializadas, fornecedoras de gases atmosféricos, processos, e camadas de metal, pó e / ou cerâmicas de alto-desempenho, serviços e tecnologias relacionadas.
Prof.	Professor
TUC	Tempo unitário de corte
TTC	Tempo total de corte
WJTA	“Waterjetting Technological Association”

## LISTA DE SÍMBOLOS

$p$	Pressão da bomba
$Q_w$	Fluxo de água
$d_0$	Diâmetro do orifício da jóia
$v$	Velocidade do bocal
$N_p$	Número de passos
$x$	Distância de afastamento
$\varphi$	Ângulo de impacto
$d_F$	Diâmetro de foco
$l_F$	Comprimento do bocal
$m_A$	Fluxo de massa
$d_p$	Diâmetro da partícula
$f(d_p)$	Distribuição granulométrica
$H_p$	Dureza
$L_T$	Largura do sulco no topo do corte
$L_B$	Largura do sulco na face inferior do corte
$T_R$	Afunilamento convergente do sulco ( $L_T/L_B$ )
$h$ liso	Altura do corte liso
$h$ total	Altura total do corte
GPP	Granito preto Piracaia
GVCB	Granito vermelho Capão Bonito
GPI	Granito prata Interlagos
MBCJ	Mármore branco Campos de Jordão
$N_m$	Número de maquinabilidade
MPa	Megapascal

## 1.— INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

### 1.1 Histórico do desenvolvimento da pesquisa sobre jato d'água no Brasil

Desde meados da década de 90, o Prof. Dr. Wildor Theodoro Hennies, Professor e Pesquisador do PMI – EPUSP, estuda a viabilidade da aplicação de técnicas não convencionais de lavra como “flame jet” e jatos d'água de elevada pressão na área da lavra de rochas ornamentais <sup>1</sup>. Nos últimos anos começou principalmente a pesquisar na área de lavra de minas com técnicas não convencionais. As técnicas não convencionais de lavra de rochas possuem grande potencial de utilização no futuro próximo. Elas podem ser utilizadas junto com os métodos de lavra convencionais ou até mesmo substituí-los, com vantagens ambientais e produtivas.

De 1998 até hoje, sob a orientação e coordenação do Prof. Hennies, foram iniciados vários projetos de pesquisa na pós-graduação do PMI - EPUSP ao nível de Mestrado e de Doutorado, vinculados à tecnologia de jato d'água de ultra-alta pressão. Constituiu-se assim o GPJAE - Grupo de Pesquisa em jatos d'água abrasivos na engenharia.

Para poder efetuar os trabalhos destes temas de pesquisa, o Prof. Hennies, através de um projeto devidamente rico em argumentos, solicitou à FAPESP um apoio financeiro necessário para aquisição de um moderno equipamento de jato d'água de ultra-alta pressão, destinado a pesquisar o corte de rochas e outros materiais de engenharia.

A FAPESP aprovou o projeto com a inclusão, do Prof. Raimondo Ciccu, da Universidade de Cagliari, Sardenha, Itália, como assessor estrangeiro do GPJAE. O Prof. Ciccu é Diretor Chefe do “DIGITA – Dipartamenti di Geingegneria e Technologie Ambientali da Università degli studi di Cagliari” e pesquisador renomeado do método de corte de materiais com jato d'água de ultra-alta pressão.

O equipamento de jato d'água abrasivo de ultra-alta pressão foi adquirido da OMAX Co., Seattle, WA. USA, com algumas vantagens econômicas. A companhia fabricante considerou o caráter didático e de pesquisa do destino do equipamento comprado, e concedeu um desconto considerável sobre preço original do produto.

No primeiro semestre de 2001 foi aprovada a dissertação de mestrado que focalizou a avaliação do corte de rochas ornamentais com espessura menor de 69

mm, mediante aplicação de jato d'água abrasivo de ultra-alta pressão <sup>2</sup>. Nessa pesquisa foi avaliado o resultado de efetuar o corte de rochas ornamentais, granitos e mármore do Estado de São Paulo, pelo método do jato abrasivo utilizando um único passo da ferramenta de corte. Os cortes foram efetuados nas velocidades determinadas pelo programa do computador (CAD) do equipamento de jato abrasivo. O fluxo de água, o suprimento de abrasivo e a pressão do jato foram mantidos constantes. Comentários sobre esses resultados são apresentados nos capítulos sucessivos do presente trabalho.

Encontra-se em andamento uma pesquisa ao nível de mestrado para aplicação do jato abrasivo ao corte e à manutenção de dutos de combustíveis. A aplicação dos resultados desta pesquisa deverá contribuir para diminuir os vazamentos de petróleo e gás em dutos que a imprensa denuncia com freqüência, refletindo, como conseqüência, na diminuição das despesas e na poluição do meio ambiente.

Ao nível de doutorado, há vários trabalhos em andamento. Um dirigido ao estudo da aplicação do jato d'água diretamente à lavra de rochas na mineração a céu aberto, o presente trabalho, que pretende continuar a avaliação do corte de rochas utilizando o jato d'água abrasivo de ultra-alta pressão, focalizando o aumento da espessura de corte mediante aplicação do método de múltiplos passos da ferramenta de corte. Outro que se dedica ao estudo dos abrasivos utilizados no corte de rochas, mas ainda com objetivos gerais.

Um trabalho de pesquisa ao nível de doutorado, que se encontra em fase de qualificação, estuda a aplicação da técnica do jato d'água pura à preparação de corpos de prova de solos para avaliação de parâmetros físicos e mecânicos com fins geotécnicos.

Tema de pesquisa com projeto em elaboração, ao nível de doutorado, que se propõe aplicar a técnica do jato d'água de pressão ao beneficiamento de areias betuminosas brasileiras, com o intuito de extrair o óleo combustível.

Ao nível de iniciação científica, efetuaram-se trabalhos de pesquisa para cortar polímeros <sup>3</sup>. Um deles com o objetivo de preparação de corpos de prova com fins de ensaios físicos universais. Os resultados obtidos propõem a substituição dos processos tradicionais que utilizam molde e injeção. Estes processos tradicionais resultam dispendiosos quando se trata da produção de poucas peças. Neste caso, a

aplicação do corte com jato d'água abrasivo é viável.

A realização do presente trabalho foi possível pelo apóio financeiro de FAPESP.

Desde a sua criação, o GPJAE do PMI – EPUSP, tem apresentado e / ou publicado trabalhos em eventos e revistas, nacionais e internacionais, sobre a tecnologia de jato d'água abrasivo e suas aplicações na engenharia. A intensidade do trabalho, a natureza dos temas pesquisados, e o rigor demonstrado todos estes anos fez com que a assessória estrangeira manifestasse sua admiração pelo nível alcançado nos resultados das pesquisas efetuadas. Destacando que o trabalho do Grupo levou o Brasil ao nível das principais universidades na pesquisa sobre uso e aplicação da tecnologia de jato d'água abrasivo de ultra-alta pressão. Alguns dos trabalhos efetuados são apresentados e analisados nas linhas abaixo.

Atualmente, o corte por jato d'água abrasivo é amplamente utilizado nos países desenvolvidos, de acordo com a grande quantidade de bibliografia existente. No Brasil, além da ICAM “empresa pioneira de corte avançado com jato d'água” e do módulo do PMI - EPUSP, existem dados não conferidos de mais dois ou três equipamentos em funções produtivas de corte de diversos materiais. Algumas firmas se constituíram em representantes das empresas fabricantes destes equipamentos e começaram a se instalar no país, mas também existem empresários brasileiros desenvolvendo e produzindo equipamentos de jato d'água para diferentes aplicações industriais. Estes fatos contribuem ao incremento do interesse geral pela tecnologia de corte por jato d'água.

O interesse se justifica pelas vantagens <sup>4</sup> que oferece esta moderna técnica de corte em qualquer tipo de material:

- ✓ Largura típica de corte menor de 1,0 mm, isto significa máximo aproveitamento do material cortado.
- ✓ Sendo o corte a frio, o material rochoso é cortado sem alteração das propriedades físicas e químicas do mesmo.
- ✓ As rochas submetidas ao corte por jato d'água ou jato d'água abrasivo não apresentam efeitos de nenhuma tensão introduzida pelo método de corte.
- ✓ O material abrasivo utilizado é o mineral de granada. Porém, alguns pesquisadores estudam o uso de outros abrasivos naturais e sintéticos.

- ✓ O sistema de controle por computador possibilita o corte de figuras de desenho complicado, onde se misturam linhas curvas e retas, de alta reprodutibilidade.

Considerando estes cinco itens, isto significa que a técnica de jato d'água abrasivo proporciona um corte preciso, com pouca perda, bom acabamento e sem aquecimento do material. No corte de rochas ornamentais, é possível efetuar o corte de chapas de granito e de mármore com alta precisão <sup>2</sup>.

## **1.2 Ordenação do conteúdo dos estudos**

Nesta tese visa-se aplicar a técnica de corte por jato abrasivo de ultra-alta pressão ao corte de rochas brasileiras utilizando os métodos de corte por passo único e de corte por múltiplos passos em espessuras maiores de 69 mm e menores de 140 mm.

No final desta introdução são apresentados os objetivos principais e específicos do trabalho. Os capítulos do atual trabalho apresentam os antecedentes históricos da origem dos jatos d'água e sua aplicação na mineração a céu aberto, mineração subterrânea e por furos de sonda, técnica que vem sendo usada na área da lavra de minas, tanto para desmonte como para transporte ou manuseio do material na mina. Segue aqui também a explicação das diferentes formas alternativas do corte com jato abrasivo, assim como uma revisão bibliográfica dos aspectos mais atualizados desta tecnologia com as vantagens dos jatos de alta velocidade gerados através de bocais de menores diâmetros, que conduzem a menores consumos de água. Também a classificação dos diferentes tipos de jatos de água utilizados na indústria moderna atual, os abrasivos empregados e os princípios dos métodos de erosão. Relatam-se os princípios de avaliação quantitativa do acabamento ou qualidade das superfícies geradas pelo corte.

No capítulo de materiais e métodos são apresentados os granitos e mármore brasileiros utilizados nesta pesquisa. São descritas de maneira resumida as características petrográficas e tecnológicas dos mesmos. Descreve-se o equipamento de jato abrasivo utilizado, as partes que o integram e como funcionam. São também descritos os programas de computador para desenhar as peças a serem cortadas e para controlar a ferramenta de corte. Documenta-se a preparação dos corpos de prova, os diferentes ensaios de corte, os parâmetros do processo com múltiplos passos e seus resultados. Descreve-se também o método de avaliação da superfície de

corte, e é apresentada a avaliação do acabamento das superfícies geradas pelo corte, que foi efetuada em laboratórios italianos especializados.

Nas interpretações dos resultados obtidos, são apresentados gráficos com os parâmetros resultantes das operações de corte nos granitos e mármore brasileiros. Estes gráficos podem servir como gabaritos para a seleção dos parâmetros de corte em trabalhos futuros com rochas semelhantes.

Conclusões da pesquisa, sobre os resultados obtidos nos estudos desenvolvidos são apresentadas no capítulo final da tese.

O projeto, que resultou do presente trabalho, foi submetido à FAPESP que o aprovou e lhe concedeu apoio financeiro para a sua execução.

### 1.3 Objetivos da Tese

#### Objetivo Principal

- Aplicação da técnica de jato d'água abrasivo de ultra-alta pressão ao corte de rochas brasileiras.

#### Objetivos específicos

-Aplicar o método de corte “por passos múltiplos da ferramenta” ao corte de rocha ornamental em espessuras maiores de 69 mm e menores de 200 mm. Compará-lo com o método de passo único do bocal.

-Determinar a efetividade do jato abrasivo no corte dos diferentes tipos petrográficos – mineralógicos. Em cada tipo avaliar o comportamento dos grãos diante do jato nas diferentes profundidades do corte.

-Avaliar a qualidade do corte através do método de medição das rugosidades ou estrias nas paredes do corte.

-Verificar o comportamento do afunilamento na aplicação do método de corte por passos múltiplos da ferramenta de corte em corpos de espessuras maiores de 69 mm e menores de 200 mm.

-Avaliar os custos do corte de rochas ornamentais com jato abrasivo.

## **2.— GENERALIDADES E REVISÃO DA LITERATURA.**

### **2.1 Histórico**

#### **2.1.1 Apresentação e generalidades.**

As rochas em geral, as ornamentais e as pedras de cantaria acompanham a civilização desde os tempos mais remotos. São encontradas em muitos utensílios e ferramentas do homem primitivo e nos mais antigos monumentos: dolmens, menires (menhirs), cromlechs, e tumbas (tumuli). A Idade da Pedra foi o marco inicial das atividades do homem e, desde então, a pedra através da História, tem colaborado a documentar, povos e costumes <sup>5</sup>.

As atividades da mineração empregaram muitos e diferentes métodos de lavra das rochas. Os homens do paleolítico utilizavam apenas as mãos ou ferramentas de pedra, depois com o passar do tempo as pás, os enxadões e outras ferramentas foram introduzidos. Hoje, na lavra das rochas ornamentais são usados equipamentos sofisticados conhecidos pelos nomes de: "cortadeiras mecânicas", "fios diamantados", o método de "plasma - blasting" e outros. No beneficiamento se utilizam palavras como "talha-bloco", (simples ou complexo, segundo a quantidade de serras diamantadas que é utilizada), "polidoras (ou politrizes) contínuas". Nos últimos tempos, a água participa diretamente nas tarefas de desmonte de rochas, e corta rochas tão resistentes quanto o mármore e o granito, através de equipamentos que utilizam tecnologia de jato d'água e/ou de jato d'água - abrasivo com ultra-alta pressão (vide Glossário em anexo).

No caso das rochas ornamentais a industrialização passa por três etapas <sup>6</sup>:

1. Extração: obtenção dos blocos retirados de maciços rochosos e de matacões.
2. Desdobramento: serragem dos blocos em chapas semi-acabadas, de espessuras variadas, utilizando máquinas denominadas teares ou talha-blocos.
3. Beneficiamento: as chapas semi-acabadas são polidas, cortadas e afeiçoadas, dando forma ao produto final.

Para a extração das rochas de cantaria, na época medieval o homem começou utilizando ferramentas hoje pouco produtivas como o serrote manual, aproveitando as partes favoráveis ao corte, por exemplo, os matacões. No caso das rochas ornamentais começaram a se desenvolver outros métodos de lavra e desmonte

visando obter blocos de rochas com características dimensionais homogêneas.

A lavra de blocos iniciou-se com explosivos nos anos 1500 – 1550 com a introdução da pólvora negra para separação dos blocos. No início do século XX, a Itália passou a usar o “fio helicoidal com abrasivos” para o corte dos blocos de mármore. A partir de 1977, foi introduzida, na região de Carrara a “tecnologia de cortador de corrente”. No espaço de 10 anos registrou-se uma rápida evolução. No início da década dos anos 90 foi introduzida a tecnologia do “fio diamantado” para corte de granitos na região de Sardenha, Itália <sup>7</sup>. A extinta URSS desenvolveu equipamentos para serragem mecânica, dotados de discos diamantados de grande diâmetro montados em três eixos, sobre trilhos de ferro. Por seu uso freqüente, todos estes métodos são conhecidos, na atualidade como métodos convencionais.

Entre os métodos não convencionais existentes é possível citar, por exemplo: os de corte e desmonte por plasma ou método de “flame jet” <sup>8</sup> (cortes térmicos efetuados com maçarico a diesel), o método eletro – hidráulico (baseado em descarga de grande energia no interior de um furo, em meio aquoso, dentro de um matacão ou do maciço rochoso) <sup>9, 10, 11, 12</sup>, e o método de corte de rochas por jato d’água abrasivo de alta pressão <sup>13</sup>.

O corte de rocha por jato d’água abrasivo de ultra-alta pressão é tecnologia relativamente nova, surgida nos últimos 20 anos nos países desenvolvidos. Utiliza sistemas computadorizados de controle, mesa X-Y, bombas de alta pressão, água, abrasivo, jóias com furo central de pequeno diâmetro para acelerar a água pressurizada, câmaras de mistura e tubos de foco de materiais especiais extra - resistentes à fricção e à abrasão que lançam o jato <sup>2</sup>. Na mineração, aplica-se em lavra a céu aberto, em lavra subterrânea, e ultimamente também no beneficiamento final e corte de peças de rochas ornamentais. Hoje, empresas produtoras deste tipo de maquinaria, anunciam equipamentos com jatos d’água pura para corte e extração de blocos de rocha ornamental em pedreiras. A lavra efetua-se baseada só nessa tecnologia ou em combinação com fios diamantados, são autômatos que podem trabalhar durante 24 horas sem precisar do operador diretamente na frente de lavra. Empresas de mineração do primeiro mundo registram o uso da tecnologia de jato d’água para a lavra e extração de minério.

### 2.1.2 Evolução histórica e aplicações dos jatos d'água.

Desde os primórdios da civilização, o homem aproveita a capacidade da água em movimento para carregar partículas. E neste princípio fundamental que se baseia a moderna tecnologia do jato d'água abrasivo de alta pressão.

A aplicação mais antiga conhecida foi o desmonte de rochas sedimentares não consolidadas. Este método é denominado desmonte hidráulico <sup>14</sup> ou mineração hidráulica. A técnica consiste em dirigir um jato d'água contra a rocha mineralizada, para desagregá-la. Outra aplicação do jato é para gerar polpa, água – minério, e deslocá-la até o ponto de coleta ou à usina de processamento.

O desmonte hidráulico iniciou-se por volta de 1830 para lavar aluviões de minério de ouro nos Montes Urais, na Rússia, e teve seu maior desenvolvimento nos campos de ouro da Califórnia, de 1852 a 1874 <sup>15</sup>. Este processo consistia em dirigir um grande jato d'água (Fig. 1) sobre cascalho e areia não consolidados para desagregá-los, lavá-los e transportá-los para uma calha onde o ouro era separado da lama.

Hoje a lavra hidráulica é aplicada em: a) lavra a céu aberto, e b) lavra subterrânea com a variante de lavra por controle remoto ou por furos de sondagem.

- a) Lavra hidráulica a céu aberto. Hoje utiliza bocais de grande diâmetro (Fig. 1), pressão baixa e se aplica em rochas friáveis, para obtenção de materiais de construção, ou minerais não metálicos industriais.

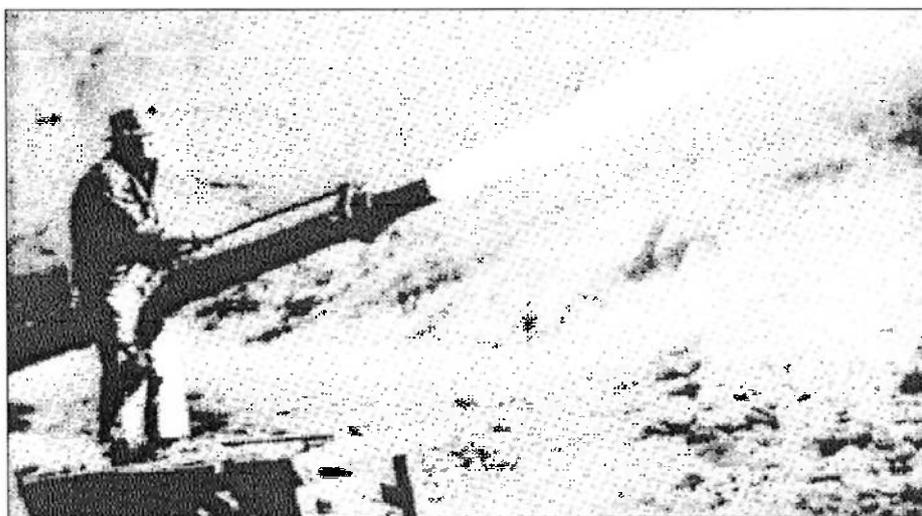


Fig. 1 Lavra hidráulica a céu aberto por jato d'água no século XIX. <sup>15</sup>

Tabela 1. Alguns exemplos de lavra hidráulica a céu aberto.

Diâmetro do bocal.	Pressão (MPa)	Vazão (L/s)	Distância do frente.	Mineral - localidade.
25 mm	0,245	125,0	40,0 (m)	Areia para construção civil, Granito prata Interlagos <sup>14</sup> . Fig. 2 Parelheiros, SP.
----	2 – 16	75,0	----	Caulim, Inglaterra. <sup>15</sup>
----	2 – 16	75,0	----	Fosfatos, Florida, Carolina do Norte. <sup>15</sup>

Fig. 2 Lavra hidráulica na pedreira da Viterbo Machado Luz Mineração Ltda. <sup>15</sup>

Tabela 2 Outros usos dos jatos d'água, na lavra a céu aberto.

Pressão (MPa)	Vazão (L/s)	Uso
3,8	21,0	Desagregação de pilhas de rejeitos antigos para recuperar teores de minério hoje interessantes e efetuar seu reprocessamento. <sup>15</sup>
255,0	0,4	Corte e desmonte de blocos de granitos, cortando ranhuras verticais de 4,5 m de profundidade com o sistema de jato d'água Ned-Jet 2000 em combinação com explosivos no piso dos blocos. (Fig. 3) Dakota do Sul e Califórnia, Estados Unidos. <sup>15</sup> .

Alguns casos com descrição mais detalhada dos principais parâmetros e características são apresentados na Tabela 3:

Tabela 3. Feições de equipamentos de significado industrial, <sup>16, 17, 18</sup> testados no campo.

Local	Rocha	Bocal (q) (mm)	Pressão (MPa)	Bomba	Vazão (L/s)	Potência (kW)	Razão de Corte (m <sup>2</sup> /h)
Elberton, USA.	Granito	(2) (0,5)	280,0	I	0,18	52	1,17
Milbank, USA.	Granito	(2) (1,2)	165,0	(?)	1,27	209	n.a.
Colorado, USA.	Granito	(1) (0,36)	310,0	I	0,1	26	0,6
Québec, Canadá.	Granito	(2) (1,4)	140,0	P	1,27	175	1,15
Rothbach, França.	Arenito	(3) (1,2)	80,0	P	1,0	160	6,5
Lanhelin, França.	Granito	(9) (0,6)	200,0	P	1,2	330	1,5
Milbank, USA.	Granito	(1) (0,9)	260,0	I	0,5	87	n.a.
Valdossola, Itália.	Gnaisse	(1) (0,5)	350,0	I	0,13	47	1,7
Sardenha, Itália.	Granito	(1) (0,96)	200,0	P	0,3	60	2,4
Japão (Subsolo)	Granito	(1) (0,96)	200,0	P	0,3	60	1,1

Símbolos: (q) – quantidade de bocais. P – Pistão. I – Intensificador.

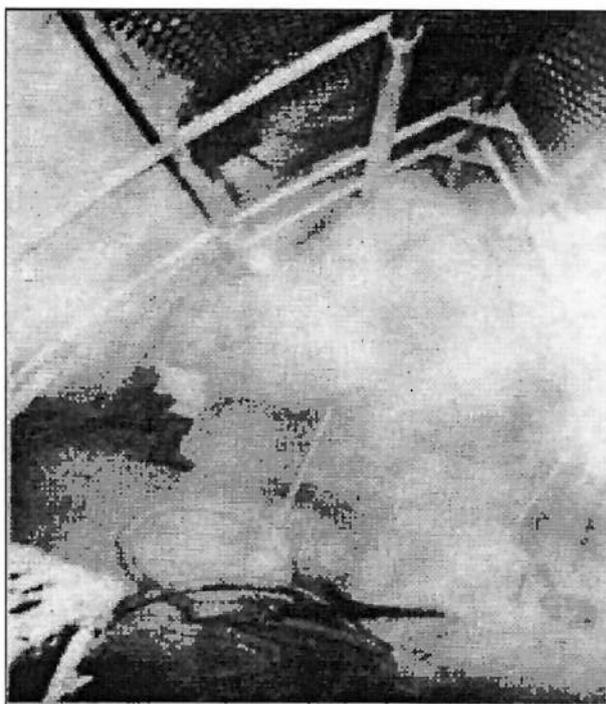


Figura 3 Corte de ranhuras em lavra de granito. <sup>15</sup>

## b) Mineração hidráulica em minas subterrâneas.

Tabela 4 Algumas aplicações de jatos d'água em lavra subterrânea.

Pressão (MPa)	Vazão (L/s)	Uso
69,0	1,13	Sistema de abertura de túneis em arenito mole no subsolo de Minnesota. O jato corta uma fenda de 5,0 cm de largura e até 2.4 m de profundidade na rocha ao redor da periferia do túnel. (Fig. 4) Em seguida, jatos perfuram três furos que são carregados com explosivos e a rocha é desmontada sem alterar o resto do maciço. <sup>16</sup>
12,5	83,3	Mineração hidráulica de carvão em subsolo. Ex – URSS, e China. O sistema consiste de monitor com um bocal de 15 - 36 mm de diâmetro, fragmentando o carvão a distâncias de 10 - 20 m. A polpa é bombeada para a superfície, o carvão é separado da água e esta é reciclada para os monitores do subsolo. <sup>16</sup>
50,0	0,5	Lavra nos quartzitos auríferos do sistema de Witwatersrand. <sup>16</sup>
345,0	----	Corte mecanicamente assistido por jato d'água em máquinas TBM para perfuração de túneis. <sup>16</sup>

Fig. 4 Corte de fendas na face de um túnel em arenito <sup>15</sup>

c) Mineração hidráulica de controle remoto ou por furo de sonda.

Alguns depósitos minerais não podem ser lavrados por métodos convencionais de lavra a céu aberto ou subterrâneo. Mas podem ser lavrados pelo método de mineração de controle remoto ou mineração por furo de sonda (Fig. 5). As pesquisas sobre a aplicação deste método começaram em 1980<sup>19</sup> no Bureau of Mines e foram posteriormente continuados<sup>20</sup> por outras companhias.

A Mineração por furo de sonda é um processo no qual a ferramenta de perfuração incorpora um sistema múltiplo de corte por jato d'água junto a um sistema de extração por bombeamento de polpa da cavidade aberta pelo jato. É usado para lavar minerais através do furo de sonda aberto da superfície ou de estações de subsolo para uma área de rocha mineralizada. Os jatos d'água da ferramenta de mineração causam a erosão do minério e formam uma polpa a qual flui para o interior de uma bomba na base da ferramenta. A polpa é enviada à usina de processamento e a água é reciclada para a ferramenta de mineração do furo de sonda.

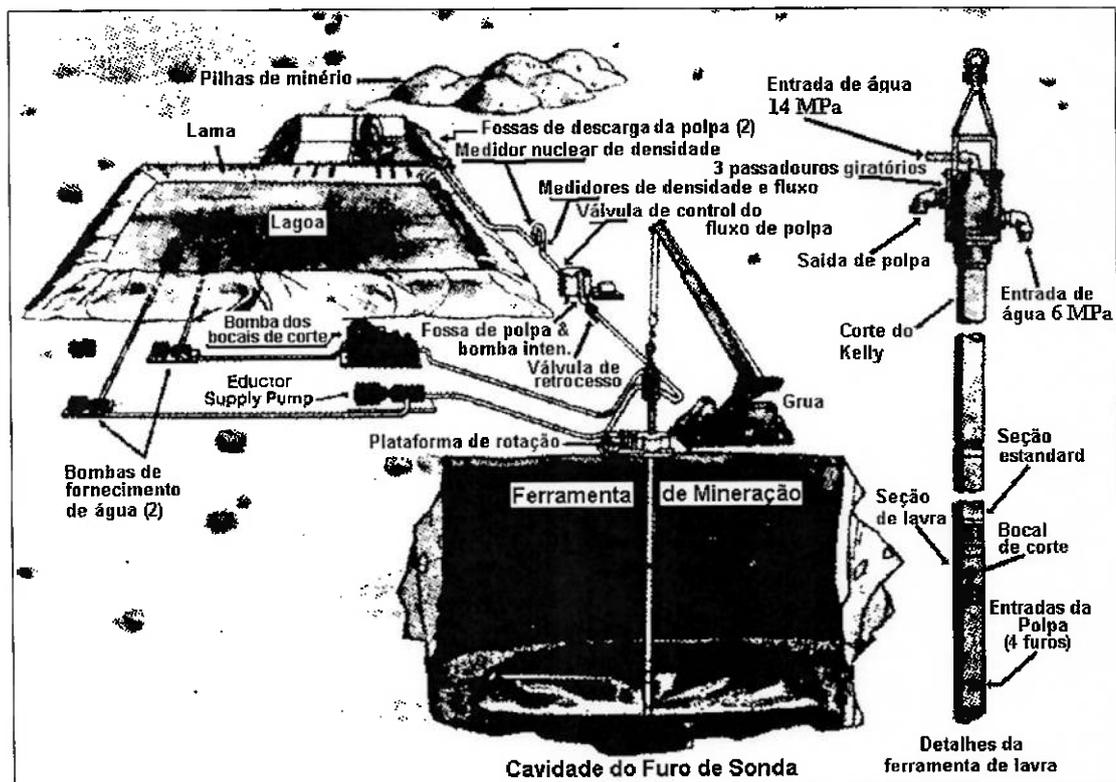


Fig. 5 Lavra de jazida de fosfatos na Flórida por furo de sonda<sup>19, 20</sup>.

A mineração por furo de sonda é um dos métodos de mineração menos agressivos ao meio ambiente. Nenhuma substância externa é introduzida no lençol de água subterrânea e nenhuma cobertura precisa ser removida. Durante a lavra, a

cavidade é cheia com água para evitar desmoronamentos além de facilitar a formação da polpa. As cavidades já lavradas são recheadas com polpa de rejeitos da própria mineração, para evitar subsidências após o abandono. Esta mineração demonstra a viabilidade técnica da extração por controle remoto de carvão, minério de urânio, minério de fosfato, minério de ferro, areia, cascalho e âmbar como polpa através de um furo de sonda. A pressão utilizada varia de 7 a 31 MPa, enquanto que a vazão vai de 12,6 L/s até 26,5 L/s.

A mineração por furo de sonda tem aplicações em remediar ambientes e é especialmente adequada para remover materiais terrosos contaminados, espalhados em situações onde a escavação convencional não é possível. O método é seletivo e pode extrair depósitos pequenos ou de distribuição aleatória. Esta seleção permite que o volume de rocha contaminado possa ser removido sem perturbar a rocha circundante ou a cobertura.

Para termos uma idéia global do Histórico do desenvolvimento da tecnologia de jatos d'água abrasivos de ultra – alta pressão, após consulta da página principal da **Waterjet-Tech, Inc. Company** <sup>21</sup> na parte referente a sua história, apresenta o seguinte quadro evolutivo da tecnologia de jato d'água:

**1971** - Fundada como Flow Research, Inc. Foi inventada a primeira bomba de água de 380 MPa de pressão. Foi inventado o processo de corte por jato d'água.

**1976** - A Flow International Corporation começa a manufaturar produtos da tecnologia de jato d'água. O restante da WTI se dedica ao desenvolvimento de processos avançados e de sistemas e serviços especiais de jato d'água.

**1981** - É inventado e patenteado o jato d'água abrasivo (AWJC).

**1990** - É inventado o jato abrasivo pré-misturado (ASJC).

**1992** – Desenvolve-se o corte de precisão de vidro denso para grandes sistemas óticos.

**1987-1994** - É desenvolvida e patenteada a moagem por jato d'água abrasivo.

**1995** - Foi inventada a bomba de 380 MPa de nitrogênio líquido. Junto com PRAXAIR, foi inventado o processo criogênico de corte.

**1996** - É desenvolvida a perfuração de micro-furos. É adquirida HydroSabre Tech. Reorganização da companhia sob o nome de Waterjet Technology Inc.

**1998** – São inventadas e patenteadas as tecnologias de waterjet “peening” e

de Newjet™ de preparação de superfícies. É desenvolvida tecnologia de corte de precisão para 0,0254 mm de tolerância. É autorizado pela primeira vez, o processo para uso de autômato de AWJ no corte da cobertura de um reator nuclear submarinho.

**2001** – Funda-se Waterjet-Tech Inc. pelos antigos empregados de Waterjet Technology e HydroSabre Technology como corporação 100% propriedade dos empregados. WTI comprou todas as restantes patentes, licencias, itens de propriedade pessoal e propriedades intelectuais das antigas companhias e as mudou para Auburn, Wa.

Casos a destacar encontrados durante a pesquisa foram:

- As aplicações da tecnologia de jato d'água à ortodontia no tratamento de cáries onde poupa dores devido à velocidade do jato, o que foi notícia de **CNN em Español.com** em meados do ano 2000.

- A produção pela Kodak <sup>22</sup> de espelhos leves para aplicações espaciais. O “back-up” para o Telescópio Espacial Hubble, produzido com tecnologia de corte por jato d'água de ultra – alta pressão e soldagem de baixa temperatura visando obter um produto de baixo peso, livre de distorções ou aberrações óticas. (Fig. 6) Adequado para utilização em sistemas de imagens para naves espaciais. O primeiro espelho ainda se encontra a bordo do Telescópio Espacial, porém Kodak fabricou o segundo espelho para reposição, caso o primeiro lançado em abril de 1990 sofresse danos.

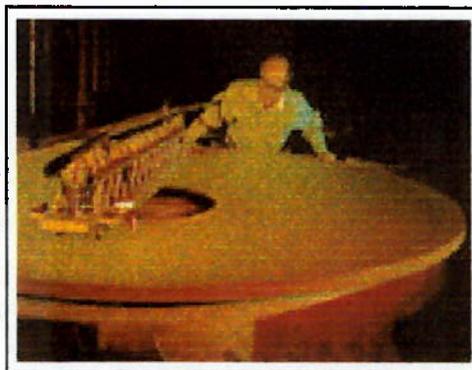


Fig. 6 Trabalhos no espelho <sup>22</sup>

Com diâmetro de 2,5 m, e peso de 773 kg, o espelho #2 se encontra ainda no armazém. Idêntico ao que se encontra no espaço, este espelho manufaturado pela Kodak não sofre de aberração esférica como foi descoberta no primeiro espelho, cortado por ferramentas convencionais, após o lançamento.

De todo este estudo dos antecedentes da tecnologia de jato abrasivo é possível estabelecer que:

- a) O uso da tecnologia de jato d'água na mineração possui antecedente histórico desde o século XIX pelo menos.
- b) O diâmetro dos bocais dos jatos apresenta tendência à diminuição através da história, que vai de vários centímetros até décimos de milímetro.
- c) A vazão de água utilizada pelo jato tem diminuído consideravelmente, passando de alguns milhares de litros por minuto até poucos L/s ou ainda menos de 1 L/s.
- d) A pressão dos jatos d'água tem aumentado geometricamente, de menos de 1 MPa até varias centenas deles. O equipamento do PMI – EPUSP, com bomba de pressão de apenas 15 kW (20 HP) chega a alcançar quase 300 MPa (42.000 psi) durante o corte sob máxima pressão.
- e) A composição dos materiais dos instrumentos e ferramentas utilizados para obter jatos abrasivos é mais sofisticada. Hoje são utilizados materiais crescidos sinteticamente para as jóias e ligas especiais como o nitreto de boro ou o carbeto de tungstênio para os tubos de mistura.
- f) A inclusão da informática para o controle do equipamento permite cortar os mais variados desenhos, e junto à força e a potência dos jatos abrasivos possibilita cortar os mais variados materiais extraduros, produzindo peças antes impensáveis.
- g) As aplicações do método do Jato Abrasivo são amplas, incluindo as áreas de Metalurgia, Materiais, Mineração, Ótica, Espacial, Saúde, Nuclear, e outras.
- h) A confiabilidade da tecnologia de corte com jato abrasivo é superior as anteriormente conhecidas. Isto é motivado por ser uma tecnologia de corte a frio, de mínimo desperdício de materiais e de alta reprodutibilidade.
- i) A aplicação do jato d'água, por utilizar um fluido natural, permite efetuar lavra menos agressiva ao meio ambiente, principalmente no caso de minerais de alto risco.

## 2.2 Classificação, aplicações e métodos de corte com jatos d'água.

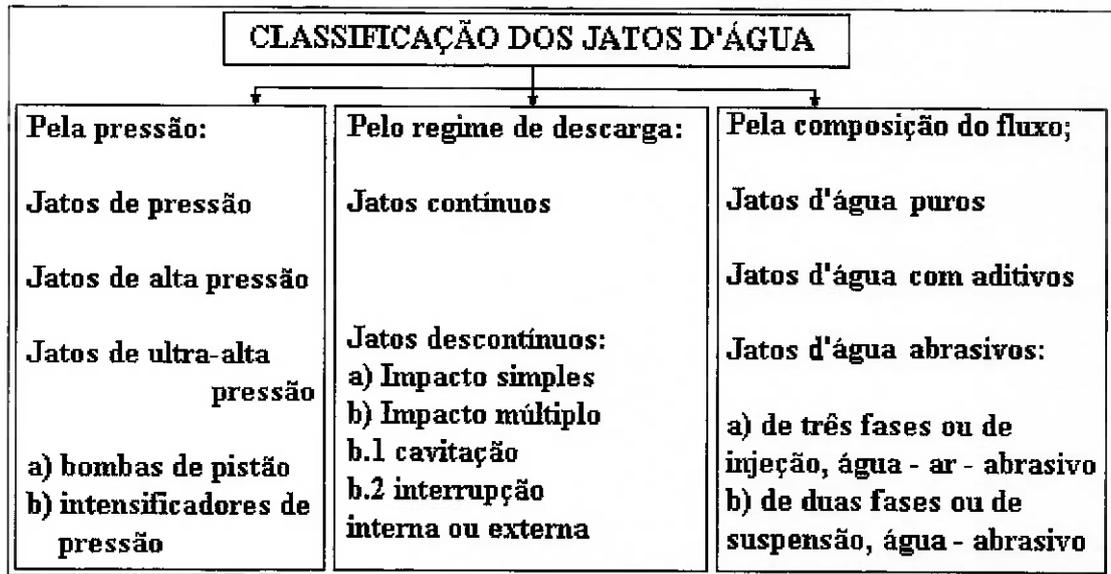


Fig. 7 Classificação dos jatos d'água modificada pelo autor desta tese.<sup>23</sup>

Segundo a WJTA, os jatos são classificados de acordo com o nível de pressão operacional aplicada<sup>20</sup>. As aplicações do jato d'água podem ser consultadas no glossário em anexo.

Em relação com o regime de descarga, geralmente pode se distinguir entre jatos d'água contínuos e descontínuos. São jatos descontínuos<sup>23</sup> aqueles que geram descargas descontínuas na zona de impacto. No entanto, todo jato d'água gera faces descontínuas durante o impacto devido às flutuações e a geração de micro - gotas<sup>24</sup>. Os "jatos descontínuos" são a produção artificial de mecanismos externos.

Segundo a composição do fluxo, os jatos podem se distinguir entre jatos d'água puros ou plenos, jatos d'água com aditivos (solúveis), e jatos d'água abrasivos (não solúveis). Segundo a Fig. 7 existem jatos d'água abrasivos de três fases, água + ar + abrasivo (injeção) e de duas fases água + abrasivo (suspensão).

Com a adição de abrasivos ao jato d'água, o seu desempenho de corte pode ser consideravelmente melhorado. Os abrasivos podem ser misturados na água antes que ela seja pressurizada. Esta pré-mistura ou suspensão precisa passar por todo o sistema de alta pressão até atingir a cabeça de corte e o bocal. No caso do jato pré-misturado, se a pressão da água estiver elevada, problemas de grande desgaste serão causados em todo o sistema. As aplicações comerciais deste processo, conhecido como corte por jato d'água abrasivo de suspensão (ASJC), são por isso limitados a 30 MPa. O método mais comum é o processo de corte por jato d'água abrasivo

(AWJC), onde os abrasivos são misturados com a água na câmara de mistura após ela ser acelerada na jóia. A alta velocidade de até 800 m/s do fluxo de água desenvolve um vácuo na câmara de mistura onde o mesmo passa. O vácuo é suficientemente intenso para sugar os abrasivos de uma tubulação para dentro da câmara na corrente de água que a atravessa. As partículas de abrasivo são então aceleradas pelo jato d'água, até 600 m/s. A água e os abrasivos são focalizados por um bocal secundário na saída da câmara de mistura, antes do jato atingir o alvo de corte. O corte por jato d'água abrasivo preferencialmente é ser usado em material duro e mesmo friável. Cada vez mais o uso dele tem ganhado diferentes aplicações.

O corte do material alvo pode ser feito pelo método de um único passo ou pelo método de múltiplos passos da ferramenta de corte<sup>25</sup>. No método de um único passo da ferramenta de corte, a espessura é cortada em sua totalidade num único passo do jato por todo o desenho. No método de múltiplos passos, o jato corta uma seção da certa espessura em cada passada, até atravessar todo o material alvo de corte. Neste último método, o operador escolhe manualmente a velocidade de corte e o número de passos ou repetições do corte em todo o desenho que tem que ser cortado.

Pesquisa desenvolvida sobre a estratégia de corte de materiais pelo método de múltiplos passos<sup>25</sup> levou em consideração que quando aplicado o método de múltiplos passos:

- As partículas de abrasivo impactam o material alvo em ângulo próximo de 90°, porém a direção de escavação do sulco é perpendicular ao feixe do jato, e aumenta a profundidade em cada passada do jato, até atravessar a peça.
- Os mecanismos de corte são diferentes em materiais dúcteis do que em materiais frágeis.
- A velocidade de translação do bocal é principal parâmetro na qualidade resultante do corte.

A pesquisa<sup>25</sup> utilizou para os testes dois tipos de rochas, granito e mármore, um metal, alumínio e um plástico, "plexiglass". Todos os materiais foram caracterizados fisicamente e finalmente classificados segundo seus atributos em: porosos (rochas) ou compactos (metal e plástico), frágeis (rochas e plástico), dúctil

(metal), muito duro (granito), de média dureza (mármore), brandos (alumínio e plexiglass).

Os resultados foram expressos segundo os parâmetros: a) número de passos necessários para atravessar a peça ( $N_p$ ), a razão de corte ( $\text{cm}^2/\text{min}$ ), a erosão específica ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ), qualidade da superfície segundo a ondulação máxima (mm).

Os custos do ensaio foram calculados segundo os indicadores seguintes:

1. Preço de compra do abrasivo (0,2 €/kg)
2. Custo unitário da energia (0,15 €/kw)
3. Salário do operador do equipamento por hora (18,0 €/h)
4. Preço do bocal e do tubo de foco por hora (2,2 €/h)
5. Custo das partes e peças de reposição (componentes elétricos e mecânicos) (6,0 €/h)
6. Custo do suprimento de água (0,7 €/h)
7. Custo da deposição de rejeitos (0,1 €/h)
8. Depreciação (18,0 €/h)
9. Fluxo de abrasivo (kg/min)
10. Consumo de água (L/h)
11. Energia hidráulica (kW)
12. Eficiência da transformação (eletro-hidráulico) (0,7)
13. Eficiência técnica (0,8)
14. Velocidade de corte ( $\text{mm}^2/\text{min}$ )
15. Espessura da peça (mm)

Levando em consideração a velocidade do bocal, para todos os casos, os custos de corte (€/m) diminuem com o aumento da velocidade do bocal. Entretanto, referido a espessura da peça de corte (até 70 mm) e a qualidade (ondulação máxima < 1 mm), o granito chega a preços superiores a 120,00 (€/m), mármore desce para menos de 20,00 (€/m), o plexiglass apresenta custos menores de 30,00 (€/m), e o alumínio apresenta custos menores de 35,00 (€/m).

Como conclusões os autores<sup>25</sup> consideram que:

- a) O método de corte por múltiplos passos da ferramenta de corte é uma estratégia que provou ter solução eficiente para ambos os pontos de vista: o técnico e o econômico.

- b) A combinação ótima dos parâmetros de corte depende principalmente das características do material a cortar. Em particular para materiais duros e friáveis ou para dúcteis e suaves a combinação de velocidade de translação do bocal relativamente baixa e suficiente fluxo de abrasivo parece a mais efetiva. Contudo, no caso de materiais friáveis e suaves os melhores resultados são obtidos com velocidades de translação do bocal relativamente altas e fluxo de abrasivo normal. Em todos os casos o uso de abrasivos de maior tamanho de partícula (50 malhas) ofereceu resultados melhores em produtividade e qualidade.

Jatos d'água são aplicados em quase todas as áreas da indústria moderna, como a indústria automotiva, indústria aeroespacial, engenharia de construção, tecnologia ambiental, engenharia de processos químicos e manutenção industrial.

Geralmente, os jatos d'água são usados para <sup>26</sup>:

- a) Operações de limpeza e desentupimento: Limpeza de esgotos, limpeza industrial de recipientes, contêineres e autoclaves, limpeza de juntas.
- b) Na construção civil: Preparação de superfícies, remoção de pinturas e coberturas, hidrodemolição de concreto.
- c) Na mineração: Lavra de jazidas a céu aberto e/ou subterrânea, fragmentação de rochas, corte de rochas ornamentais, operações mineiras assistidas, perfuração de solos e rochas.
- d) Tratamento de solos: Estabilização de solos, descontaminação.
- e) Outras aplicações: Reciclagem de materiais, operação de manufaturas, fragmentação de materiais com jatos d'água pura, limpeza de superfícies com jatos d'água pura, manufatura convencional com assistência de jatos d'água, corte de materiais difíceis com jatos d'água abrasivos, moagem e corte 3-D com jatos d'água abrasivos, torneamento com jatos d'água abrasivos, gravação e perfuração com jatos d'água abrasivos, polimento de materiais com jatos d'água abrasivos.

### **2.3 Jatos d'água no corte de rochas.**

Em 2000, o GPJAE apresentou em evento internacional em Canadá o seu Programa Brasileiro de pesquisas em jatos d'água de ultra-alta pressão para corte de rochas ornamentais. <sup>13</sup> Nesse programa, se anunciava a entrada do Brasil na pesquisa

científica da aplicação dos fluidos de alta energia para o corte, não só de rochas ornamentais, mas também de diversos materiais de engenharia. No programa anunciava-se também a parceria da EPUSP com a Universidade de Cagliari, da Sardenha, Itália para aproveitar ao máximo o moderno equipamento de jato d'água abrasivo de ultra-alta pressão da OMAX, adquirido com apoio financeiro da FAPESP.

Também no ano 2000, porém na Grécia, se apresentavam os primeiros trabalhos do Grupo. Os parâmetros tecnológicos das rochas submetidas ao corte com jato d'água abrasivo de ultra-alta pressão <sup>27</sup> foram analisados em um desses trabalhos. O trabalho utilizou o princípio de que a análise termodinâmica de mecanismos de remoção de materiais indica que uma ferramenta ideal para corte de materiais seria um feixe de alta energia, de largura pequena do sulco cortado, de profundidade controlada com precisão e direção de penetração, sem alterações da superfície gerada. Para o processo ser viável, a produção do feixe deverá ser relativamente econômica e de ruído ambientalmente amigável, enquanto que a taxa de remoção de material deverá ser razoavelmente alta. Um fluxo estreito de água de alta energia misturado com partículas abrasivas esta proximo de satisfazer estas exigências porque como tem se comprovado nos últimos anos, o corte com jato d'água abrasivo de ultra-alta pressão se tornou uma das tecnologias principais industriais em um período relativamente pequeno de tempo. <sup>28</sup> Depois de efetuados os cortes em rochas brasileiras <sup>27</sup>, o artigo concluiu que:

1.- O módulo de jato d'água abrasivo de ultra-alta pressão da OMAX trabalha bem no corte de mármore e chapas de granito até 50 mm de espessura, com bom acabamento das superfícies. Tanto em ladrilhos como em azulejos com espessuras de chapas entre 10 mm e 30 mm, os desenhos mais complexos são cortados facilmente.

2.- Cortes retos são mais rápidos de fazer, mas o sistema também trabalha bem em cortes circulares, porém com velocidades mais baixas.

3.- A precisão dos produtos obtidos através do projeto do CAD do computador da máquina é muito alta, o que foi demonstrado nos ensaios do artigo.

Outro artigo apresentado, também na Grécia 2000, fez uma caracterização tecnológica dos diversos materiais ensaiados como abrasivos no módulo de jato d'água abrasivo do LMR – PMI – EPUSP <sup>29</sup>. Embora o material mais amplamente

utilizado neste tipo de equipamento seja o mineral de granada de 0,177 mm (80 mesh) de granulometria, o GPJAE estudou o comportamento de granadas naturais de vários produtores e ainda testou o desempenho de abrasivos sintéticos como alumina e carbetto de silício (“carborundum”). Entre as substâncias abrasivas analisadas se encontram granadas importadas dos Estados Unidos e da Índia, alumina e carbetto de silício da ALCOA do Brasil e também foi analisada uma granada brasileira recuperada de rejeitos das areias monazíticas processadas pela NUCLEMON, com o objetivo de produzir combustível nuclear para a geração de energia elétrica em Angra dos Reis, em outro trabalho dos integrantes do GPJAE (vide trabalhos citados página 23). O estudo foi motivado pela ausência de granada brasileira no mercado e a necessidade de importá-la. Dentro do artigo se apresentam resultados de difração de raios X (o principal mineral das granadas é almandino e almandita), da classificação granulométrica (mesmo que se compre como 80 mesh, a análise granulométrica demonstrou que todos os produtos apresentam uma curva próxima da vertical entre 100 e 1000  $\mu\text{m}$  ou 140 – 18 mesh), da composição química (a granada brasileira apresenta teores de Si e de Al maiores que as importadas), da dureza Vicker e Knoop (a granada brasileira só perde para a granada da Barton que possui tratamento térmico para endurecer a superfície), da esfericidade qualitativa (em microfotografias) e quantitativa das partículas das substâncias analisadas (a granada brasileira apresenta arredondamento maior que as granadas importadas, com certeza devido à sua origem sedimentar). Duas conclusões principais foram obtidas do estudo: 1) a granada brasileira experimentada possui propriedades adequadas para ser utilizada em cortes com sistemas de jatos d’água abrasivos de ultra-alta pressão e, 2) a utilização de abrasivos sintéticos afeta a vida útil das partes e peças integrantes do bocal de corte do módulo de jato d’água abrasivo.

Em evento Internacional celebrado na Índia em 2001, foi apresentado um trabalho sobre as aplicações do jato d’água de alta pressão na mineração e outros campos da indústria.<sup>30</sup> No artigo, foram analisadas as aplicações dos jatos de duas e de três fases. No caso de trabalhos de corte em dutos combustíveis e outros com risco de incêndio, é recomendável a utilização do jato d’água em suspensão onde somente há água e abrasivo. Mas nos casos de corte de materiais de engenharia não inflamáveis, é possível aplicar o jato de três fases ou de injeção, configurado com

água + ar + abrasivo. Destacam-se os casos de aplicação de jatos d'água puros na manipulação de alimentos e plásticos.

Também em 2001, mas nos Estados Unidos, apresentou-se trabalho sobre o desempenho da tecnologia de corte por jatos d'água em rochas ornamentais.<sup>31</sup> No trabalho, são apresentados os resultados obtidos no corte de mármore e granitos brasileiros com desenhos retos e curvos. Além de avaliar os parâmetros de corte, foi estudado o acabamento das superfícies criadas pelo corte com jato d'água abrasivo de ultra-alta pressão. Concluiu-se que a característica poli-mineral das rochas influi na profundidade do corte.

Também em 2001, em evento internacional celebrado em Florianópolis, foi apresentada uma caracterização tecnológica mais aprimorada da granada brasileira já citada.<sup>32, 33</sup>

Já em 2002, a produção de artigos científicos na técnica de campo de jatos d'água na engenharia foi acrescentada nos campos de aplicação, quantidade e qualidade. Em evento nacional, apresentou-se trabalho de pesquisa sobre a preparação de pisos cerâmicos.<sup>34</sup> O trabalho demonstrou que é possível realizar projetos de pisos artísticos elaborados constituídos de ladrilhos. No artigo, são feitas considerações fundamentais da tecnologia de corte por ultra-alta pressão e resultado de aplicação em ladrilhos cerâmicos, feitos no sistema.

Trabalho relacionado com o tema de corte, mas também com a gravação de materiais friáveis foi publicado no Boletim Técnico da EPUSP<sup>35</sup>. As considerações finais do trabalho são:

- a) Na comparação entre eficiência e custos para diferentes métodos verifica-se que os processos térmicos têm vantagens na velocidade de corte e subseqüentemente nos custos de corte também. Portanto, o jato d'água abrasivo somente deve ser usado se suas vantagens efetivamente funcionarem.
- b) Na indústria de rochas ornamentais e na indústria cerâmica de ladrilhos, o jato d'água abrasivo tem se tornado bastante importante porque os processos de corte térmico não podem ser aplicados. Até a introdução do corte por jatos abrasivos, o corte de rochas ornamentais e cerâmicas era realizado com serras e máquinas de

desbaste. Com as serras circulares adiamantadas, somente cortes retilíneos eram feitos. Os contornos apenas podiam ser ajustados manualmente. O jato d'água abrasivo torna possível cortar qualquer material que é usado nas indústrias de rochas ornamentais e correlatas. Mesmo os materiais extremamente duros e friáveis podem ser cortados com este método à velocidade razoável.

Nesse ano de 2002, efetuaram-se os primeiros trabalhos de corte de polímeros que se apresentaram em dois eventos, um nacional em Natal, <sup>36</sup> e outro internacional em Acapulco <sup>4</sup>. Estes trabalhos estudaram o corte de chapas industriais de ABS, PMMA, PSAL, e GPPS de 3 mm de espessura, fornecidas pela RESARBRAS da BAHIA S.A. Nas chapas, foram cortados corpos de prova de forma gravata com 214 mm de comprimento segundo a Norma ASTM D638, utilizando jato d'água de ultra-alta pressão, serra manual e elétrica. Os melhores resultados em produtividade e qualidade de acabamento foram obtidos com a maior velocidade de translação do bocal, 76 mm/s. Um corpo de prova foi produzido a cada 14 segundos. As principais conclusões foram:

a) Foi demonstrada a viabilidade do corte de peças em materiais poliméricos utilizando jato d'água de ultra-alta pressão, sendo os melhores resultados aqueles de maior velocidade de corte (qualidade 1).

b) Com o jato d'água de ultra-alta pressão, obtiveram-se velocidades de corte de 12 a 30 vezes maiores que as obtidas com serra elétrica e de 30 a 70 vezes à aquelas com corte manual.

c) Em geral, o corte com jato d'água abrasivo de ultra-alta pressão, deixa a peça pronta para o ensaio de tração, sem necessidade de qualquer operação de acabamento adicional.

d) Por outro lado, nos corpos de prova cortados com serra manual ou elétrica se originaram tensões internas, produto do calor gerado pela fricção. Como consequência destas tensões internas no corpo de prova, verifica-se no ensaio de tração, a ruptura do mesmo nas garras de segurança da prensa falseando deste modo os resultados dos ensaios. Este defeito não se apresentou nos corpos de prova que foram cortados com o jato d'água abrasivo de ultra-alta pressão.

Trabalho apresentado em evento internacional na Sardenha, tratava da

aplicação de tecnologia avançada de jato d'água abrasivo na realização de desenhos e gravações complexas em materiais friáveis<sup>37</sup>. Foi enfrentado problema de início do corte em que o estalo inicial do jato em materiais friáveis causa uma fratura que afeta o desenho final e que pôde ser resolvido cobrindo a área de corte com fita crepe, a qual absorve parte do efeito negativo do primeiro impacto sobre o alvo de corte.

Tabela 5 Estimativa de custo de corte de cerâmica por jato d'água abrasivo.<sup>35,37</sup>

ITEM	VALOR
1. Custo de aquisição do equipamento:	US\$ 120.000,00
2. Taxa Alfandegária, Imposto de importação e ICMS:	US\$ 85.440,00
Total:	US\$ 205.440,00
Amortização 10.000 horas. Custo horário	US\$ 20,54
Juros anuais 20%	US\$ 4,11
Custo horário da propriedade:	US\$ 24,65
Taxa cambial (1 US\$ = 2,50 R\$)	R\$ 61,62
3.- Custo de operação (por hora)	
3.1 Operador (Mão de obra)	R\$17,00
3.2 Custos do consumo de abrasivo	R\$ 38,40
3.3 Jóia e tubo de mistura (substituição a cada 40 horas)	20,35
3.4 Energia (R\$ 0.25/kwh)	R\$ 4,50
3.5 Manutenção da mesa	R\$ 2,55
3.6 Substituição de componentes de alta pressão	R\$9,43
3.7 Sistema de água destilada (240 L/h)	R\$ 4,80
3.8 Ar comprimido	R\$ 2,35
Custo total de operação	R\$ 99,38
4.- Custos totais de propriedade e de operação por hora.	R\$ 161,00
Custo por minuto	R\$ 2,68
Custo por m de corte em ladrilho de cerâmica vermelha de 5,0 mm de espessura	R\$ 2,75
Custo total da calçada (21,96 min)	R\$ 58,96
Custo da calçada (por metro quadrado)	R\$ 7,97

Outra tarefa resolvida neste trabalho foi o de gravar em chapa de mármore

sem cortar a mesma. Como exemplo, foi elaborado um quadro com agradecimentos à FAPESP pelo apoio financeiro, que possibilitou a compra do módulo de jato d'água abrasivo de ultra-alta pressão do LMR – PMI – EPUSP. O quadro ou a chapa gravada foi fixado na parede do próprio laboratório durante a cerimônia oficial de inauguração do mesmo.

Nesse mesmo evento celebrado em Cagliari, foi apresentado o primeiro de uma série de trabalhos de aplicação da técnica de jato d'água pura de ultra-alta pressão ao corte e configuração de corpos de prova de solos <sup>38</sup> para ensaios geotécnicos. O objetivo principal do trabalho é conseguir a configuração cilíndrica dos corpos de prova em solos argilosos e em solos arenosos, para efetuar a avaliação dos solos em áreas de deposição de rejeitos de mineração ou de beneficiamento, ou ainda, a reabilitação de áreas antigas de mineração. Os métodos atuais são artesanais e introduzem tensões que alteram as condições iniciais dos solos. É um trabalho importante por existirem poucas aplicações de jatos d'água nos trabalhos com solos. As amostras foram cortadas e configuradas em tempos curtos de somente 14 a 34 segundos somente. Como conclusão importante foi determinado que a velocidade ideal de translação do bocal fica entre 10 e 12 mm/s, pois com maiores velocidades o corte é imperfeito, enquanto que com velocidade menor a água afeta o solo. O resultado mais importante foi que os grãos de quartzo contidos no solo foram cortados perfeitamente pelo jato d'água, algo que pelos métodos tradicionais é totalmente impossível.

Procurando otimizar a quantidade de amostras a utilizar em qualquer pesquisa e a quantidade de ensaios, foi apresentado trabalho referente em evento internacional na França, que tratava da introdução de um método avançado de experimentação <sup>39</sup>. O trabalho explica como no Brasil, o interesse pela técnica de jato d'água abrasivo e / ou pura aumenta segundo se conhecem as aplicações úteis no corte de materiais, rochas ornamentais, hidro - demolição, automotriz e outras. E como por isso, constantemente, surgem novas solicitações de propostas de pesquisas com diferentes materiais naturais ou sintéticos, o que motiva a realização de testes de corte para determinar as combinações mais eficientes dos parâmetros de corte. A aplicação das sugestões deste artigo permite diminuir o número de cortes de testes e conseqüentemente, o número de amostras a ensaiar. Isto diminui o tempo e o custo

das pesquisas. Um exemplo da aplicação do método de racionalização é efetuar os ensaios com velocidade de translação constante, pressão constante, variando o tipo de abrasivo a utilizar e medindo a profundidade de corte resultante de cada ensaio.

No mesmo evento na França, apresentou-se o segundo trabalho sobre aplicação de jatos no estudo dos solos. Neste caso, o trabalho estudou a aplicação do jato d'água pura para a configuração dos corpos de prova de solos.<sup>40</sup>

O trabalho focalizou a preparação dos corpos de prova de solos para efetuar ensaios físicos e de descontaminação. A maior vantagem do trabalho é que o jato d'água pura de ultra-alta pressão consegue preparar os corpos de prova com rapidez e sem alteração, permitindo efetuar todos os ensaios sem que os corpos de prova percam as condições naturais. O trabalho demonstrou que no caso dos solos arenosos, a preparação dos corpos de prova é melhor que no caso dos solos argilosos.

Em evento internacional realizado na República Tcheca, foi apresentado trabalho que aplica o método de rugosimetria para a avaliação quantitativa da qualidade de corte<sup>41</sup> nas rochas ornamentais. O artigo utilizou amostras de granitos e mármore brasileiros, nas quais foram efetuados cortes pelo método de passo único ou pelo método de múltiplos passos do bocal. No trabalho são estudadas as áreas de corte liso e de corte rugoso. O artigo é o primeiro do GPJAE nas técnicas de avaliação de qualidade das superfícies criadas pelo corte com jato d'água abrasivo em rochas. São explicados os diferentes indicadores de rugosimetria medidos pelo Perthometro. A avaliação de rugosimetria foi feita de maneira preliminar nas amostras de granito preto Piracaia. Conclusões deste trabalho são: a rugosidade  $R_p$  e a profundidade de ondulação  $W_t$  crescem com o aumento das velocidades de translação do bocal. O aumento do número de passos do bocal acompanhando a velocidade de translação resulta em indicadores de rugosidade superiores ao cut-off do Perthometro. O que significa que a superfície de corte resultante não foi suficientemente acabada para a espessura cortada, com aqueles parâmetros de corte da pressão do jato e o fluxo de abrasivo de consumo.

Trabalho mais aprimorado sobre avaliação de rugosimetria nas amostras dos granitos e mármore brasileiros, que foram cortados com jato d'água abrasivo durante esta pesquisa, pode ser conferido no ponto 4.3 do capítulo Resultados.

O autor desta tese quer destacar que, embora o jato corte os materiais friáveis

pela erosão das partículas constituintes do material alvo em toda a seção de corte, neste trabalho isto se denominará como **efeito de erosão** ao arranque de grãos minerais produzindo orifícios ou furos na superfície de corte que não apresentam continuidade da área de corte em que se produzem, seja esta área de corte liso ou área de corte rugoso. Uma descrição de pontos de erosão pode ser conferida no ponto 4.4 do capítulo Resultados.

Artigos tratando a questão da qualidade do corte, porém com visão diferente, foram apresentados em evento internacional por pesquisadores italianos. No primeiro deles, <sup>42</sup> os autores estudam o problema da segurança nas superfícies de rochas extremamente polidas e por tanto escorregadias. Analisam os vários equipamentos hoje disponíveis no mercado, entre outros: máquina de martelos pequenos, o “jateado” com areia, o sistema por jato de chama e o sistema por jato d’água pura. Explicam que o sistema por jato d’água pura ainda não é muito popular por causa do custo elevado do equipamento, mas que a qualidade do trabalho com esta técnica é superior por expor os planos de clivagem dos minerais, as cores originais sem alterações e a textura da rocha. O teste foi efetuado em mármore “Bianco Carrara”, utilizaram granada 50 malhas da Barton que classificaram em duas frações, grossa e fina e com diferente fluxo de abrasivo em cada teste. Operaram com diferentes distâncias de afastamento entre o tubo de foco e o material alvo. Variaram também as velocidades de translação do bocal. Como conclusões deste artigo os autores apresentaram que:

Os dados resultantes dos ensaios do modelo proposto demonstram a capacidade de prognosticar o efeito do jato abrasivo na superfície de uma rocha como função dos parâmetros operacionais estabelecidos, especialmente: pressão, configuração do bocal, fluxo de abrasivo, velocidade do bocal e distância de afastamento entre o bocal e a superfície alvo. Por isso, é possível fazer o melhor uso da tecnologia para cumprir com as tarefas de corte, gravação, desenho e ainda para substituir o método de jato de areia ou “sand-blasting”.

Referente à segurança, as micro-crateras resultantes do impacto do abrasivo na superfície polida fazem que o piso ou os degraus assim produzidos sejam menos escorregadios com a menor alteração da aparência da rocha.

No segundo artigo <sup>43</sup> sobre o tema de tratamento superficial, foi aplicado o

teste a mármore “Coreno Perlato Royal”, o qual, segundo os autores, possui propriedades físicas e mecânicas superiores às do mármore branco de Carrara. Neste trabalho, chegaram a conclusões parecidas às do artigo anterior no que se refere aos parâmetros operacionais. Porém, quanto às superfícies obtidas, os autores acham que não há grande diferença entre as produzidas pelos equipamentos já conhecidos como o “sand-blasting” e as produzidas com o jato d’água abrasivo. Aliás, a superfície produzida pelo jato d’água abrasivo com pressão de 100 MPa, parece mais ter sido produzida pelo jato de areia. Finalmente os autores destacam as conveniências do uso da tecnologia de jato d’água abrasivo pela facilidade de desenhar linhas curvas de rádio variável.

No começo do ano 2003, o GPJAE trabalhou numa pesquisa para fabricação de peneiras de polipropileno para paredes de tambores de galvanoplastia utilizando a tecnologia de jato d’água pura e com abrasivo <sup>44</sup>. O trabalho vai ser apresentado em evento brasileiro de Polímeros no fim do ano. Em geral o corte de chapas neste sistema origina um sulco ou ranhura que tem características próprias. A largura do sulco é, em geral, maior no topo que na base da chapa. No corte aparecem rebarbas na base como fibras. Experiência adquirida na preparação de furos de peneiras em plásticos, onde o número de furos a ser aberto é decisivo no custo da peça, são detalhadamente descritos. Ensaio preliminares foram simulados para alta qualidade de corte, média qualidade e simples corte, além do corte com água pura. A perfuração de 900 furos numa área de cerca de 967 cm<sup>2</sup> revelou consumir 201 minutos sendo a mais onerosa, contra 126 minutos para o corte com água pura. Após testes de laboratório, novos desenhos de modelos de peneira foram propostos para acelerar o processo de abertura das malhas diminuindo o número de furos, contudo, preservando o índice de vazamento da peneira. Assim, 145 furos na área acima, 218 ou 362 são possíveis. Além disso, um corte de velocidade constante e com abrasivo mostrou-se eficiente. Por outro lado, o modo de abrir o furo influi na qualidade da peneira produzida.

Como principais conclusões desta pesquisa de otimização de corte do polímero de polipropileno para a fabricação de peneiras, algumas conclusões importantes podem ser estabelecidas:

- a) O uso dos padrões de qualidade que o sistema de jato d'água abrasivo de ultra-alta pressão da OMAX fornece, por vezes, não é aconselhado quando novos serviços são executados.
- b) Testes em amostras do material são necessários para observação dos resultados.
- c) No corte de chapas de polipropileno com espessura de 10 mm, melhores resultados são obtidos quando adotamos velocidade de corte de 25 mm/s com jato abrasivo e 5 mm/s quando cortamos com jato d'água pura.
- d) A forma de corte ideal da abertura da malha da peneira consiste numa espiral regular, cortando-se inicialmente a parte central do furo e a seguir em quatro linhas paralelas espaçadas de 0,4 mm até atingir a periferia do furo, com 1,2 mm de largura, com extremidades em semicírculo.

O autor desta Tese quer destacar que:

- Tanto neste trabalho quanto no anterior, apresentado em Acapulco, aplicando-se o jato d'água abrasivo de ultra-alta pressão ao corte de chapas de polímeros, melhores resultados quanto ao acabamento e à produtividade foram obtidos, utilizando velocidades de translação do bocal superiores às sugeridas pelo programa MAKE da máquina. Por isso, é preciso testar o desempenho de cada material novo antes de começar um projeto.
- Quando se cortam rochas e outros materiais de elevada dureza, as menores velocidades de translação do bocal são as que produzem melhores qualidades de acabamento. Inversamente, quando se cortam materiais poliméricos de muito menor dureza, melhores resultados de acabamento são obtidos com velocidades de translação do bocal maiores. Isto indica a influencia no acabamento das peças do tipo de material a cortar com jato d'água abrasivo. Assim, num material macio, a transmissão da energia do impacto das partículas de abrasivo é menos eficiente no material alvo. Enquanto que, os constituintes de materiais duros e frágeis, como os metais, compósitos, as rochas e outros materiais friáveis, transmitem essa energia do impacto dos grãos de abrasivo aos grãos do material, facilitando o corte. Exemplo do que este autor quer destacar sobre a transmissão de energia entre partículas constituintes do material alvo é representado no célebre experimento de

Física com os pêndulos. Enquanto os pêndulos centrais permanecem fixos, os dois dos extremos estão em movimento, o primeiro por ter sido levantado pela mão do professor, o último por receber a transmissão de energia cinética do primeiro, que cai através dos pêndulos fixos.

- É claro que a baixa resistência dos polímeros ante o impacto das partículas de abrasivo, combinada com a fluência de grãos e a velocidade de translação do bocal são os parâmetros que determinam a qualidade de corte neste tipo de materiais.

Também no início do ano 2003, os integrantes do GPJAE, trabalharam numa pesquisa que focaliza a recuperação do abrasivo utilizado e depositado no fundo do reservatório de água da mesa XY <sup>45</sup>. Até então, toda a pesquisa desenvolvida foi dirigida, especificamente, ao corte de materiais como: rochas ornamentais brasileiras, corte de dutos metálicos de combustíveis, corte de materiais friáveis cerâmicos, solos, polímeros, e outros. O próprio desenvolvimento dos trabalhos de pesquisa mostrou as amplas áreas de pesquisa existentes dentro do método de corte. Ao analisar os componentes de custo das operações de corte com esta técnica avançada, constatou-se que o elemento mais caro é o abrasivo: granada natural 80 malhas. O motivo do elevado custo está em que é material importado. Em 2001, o preço do produto estava em \$2,15 USD / kg. Por isto, entre as principais áreas a serem pesquisadas pelo Grupo estão: a) Substituição dos abrasivos importados por abrasivos brasileiros; e, b) Estudos de reciclagem do abrasivo usado no sistema. O trabalho analisa a recuperação da granada já utilizada para sua re-aplicação na tecnologia de corte citada.

A partir do estudo dos resíduos do tanque de coleta, podemos estabelecer as seguintes conclusões gerais:

1.- O abrasivo (granada importada) pode ser reciclado com vantagem, onde a fração de interesse entre 48 malhas (320  $\mu\text{m}$ ) e 150 malhas (100  $\mu\text{m}$ ) representa 74% da massa total de resíduo.

2.- Do que foi descrito no item anterior decorre uma vantagem econômica, onde do total de abrasivo utilizado em três anos de operação, cerca de 1 tonelada, compõe cerca de 740 kg de material que pode ser recuperado e reutilizado.

### 3.— MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Rochas utilizadas na pesquisa

As rochas utilizadas nesta pesquisa foram coletadas nas mesmas jazidas onde foram coletadas as amostras utilizadas durante pesquisa de mestrado <sup>2</sup> já aprovada. Descrições das jazidas e das suas localizações (Fig. 1), podem se consultar em vários trabalhos publicados <sup>46, 47, 48, 49</sup> e na dissertação citada <sup>2</sup>. As rochas analisadas: Granito vermelho de Capão Bonito, Granito preto de Piracaia, Granito prata Interlagos e Mármore branco Mantiqueira (Campos de Jordão), provenientes do Estado de São Paulo (Fig. 8, 9, 10, 11, e 12). Descrição mineralógica resumida e as propriedades tecnológicas são mostradas nas tabelas 6, e 7.

Tabela 6. Rochas utilizadas. Petrografia e mineralogia. <sup>46, 47, 48</sup>

Nome Comercial	Granito vermelho Capão Bonito	Granito preto Piracaia	Granito prata Interlagos	Mármore branco Mantiqueira
Tipo petrográfico	Biotita monzogranito	Biotita hornblenda quartzo monzogranito	Biotita monzogranito	Calcita – dolomita mármore
Composição mineralógica (%)	Microclínio pertítico 35 Quartzo 30 Oligoclásio 25 Biotita 10	Andesina – oligoclásio 35 Hornblenda 25 Biotita 15 Microclínio pertítico 15 Quartzo 5 Titanita e opacos 5	Oligoclásio 30 Quartzo 30 Microclínio* 25 Biotita 15 Moscovita <5	Dolomita* 90 Calcita* 10 Olivina 5
Acessórios %	Opacos, apatita, zircão e fluorita	Apatita e epidoto 5	Titanita, apatita, zircão, turmalina	-----
Secundários	Sericita, clorita, carbonato, hidróxidos de ferro, e minerais argilosos	Carbonato	Sericita, clorita, carbonato e fluorita	Tremolita, crisotila e talco.

\* Máximo

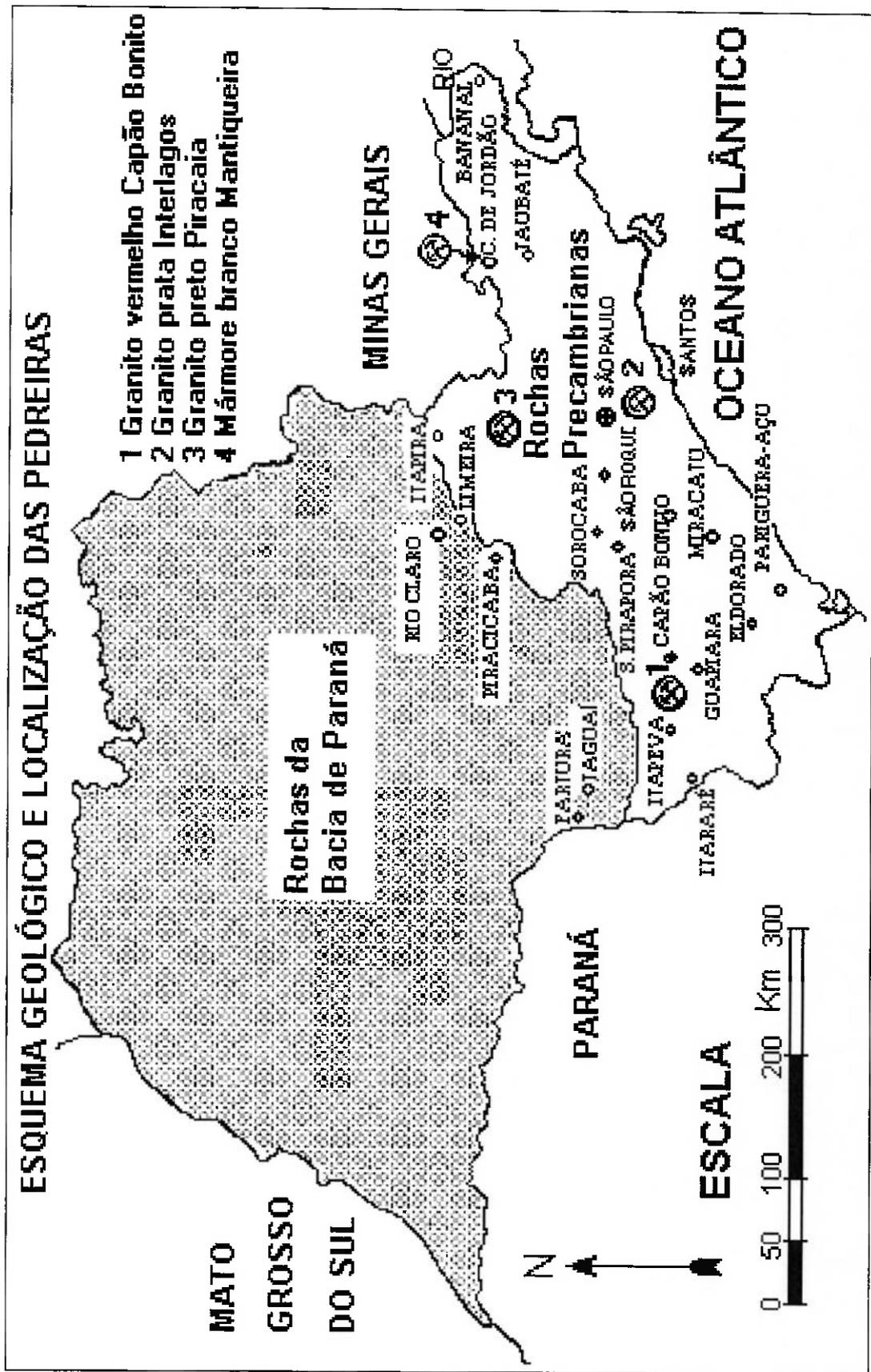


Fig. 8 Esquema geológico do Estado de São Paulo e localização das pedreiras.

Tabela Nº 7. Caracterização das rochas utilizadas<sup>31, 46, 47</sup>

Características físicas – mecânicas	GVCB	GPP	GPI	MBCJ
Massa específica aparente seca (kg/m <sup>3</sup> )	2,638	2,844	2,632	2,833
Porosidade aparente (%)	0,49	0,50	0,57	0,53
Absorção de água (%)	0,19	0,18	0,22	0,19
Compressão uniaxial ao natural (MPa)	149,8	167,1	176,9	108,5
Compressão uniaxial após congelamento e degelo (MPa)	142,7	149,5	171,9	101,4
Tração na flexão (MPa)	14,75	15,75	17,47	9,84
Módulo de deformabilidade estático(GPa)	56,1	32,963	----	55,277
Velocidade de propagação de ondas (m/s)	5.590	5.010	5.310	5.790
Dilatação térmica linear (10 <sup>-3</sup> mm/m °C)	7,3	6,3	7,0	8,1
Desgaste Amler (mm/1.000 m)	0,60	1,05	0,69	4,42
Flexão (Mpa)	12,51	18,69	15,63	----
Impacto de corpo duro (m)	0,56	0,88	0,65	----

O aspecto das rochas depois de polidas e mostrado nas Fig. 2, 3, 4 e 5.

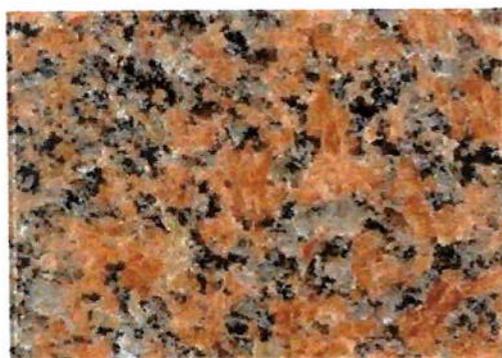


Fig. 9. Granito vermelho Capão Bonito



Fig. 10. Granito preto Piracaia



Fig. 11. Granito prata Interlagos



Fig. 12. Mármore branco Mantiqueira

### 3.2 Equipamento de Jato de água abrasivo de ultra-alta pressão do PMI-EPUSP

Durante a pesquisa técnica e comercial, para obter o equipamento de jato abrasivo adequado à pesquisa, encontrou-se que no mundo todo, existem  $\approx$  2.000 oficinas de jato abrasivo, a maioria, fundamentalmente em países do Primeiro Mundo. Porém apenas 10 % trabalham o corte de rochas como produção principal.

No Brasil, a Union Carbide trabalha com essa tecnologia para corte de mantas de isolamento. Na cidade de São Carlos, Estado de São Paulo existe uma oficina de jato abrasivo pertencente a ICAM – Industria Comercializadora de Artefatos de Metal. Também a Ford Motor Co. do Brasil utiliza a tecnologia na produção e acabamento de partes e peças de automóveis.

Procurando as características técnicas próprias do sistema de corte por jato de água controlado por computador, além do preço e condições de importação menos dispendiosas, foram contatadas “Ingersoll-Rand Fluid Products” e sua filial brasileira, “Ingersoll Rand do Brasil Ltda.”; o “GRUPO DAM de ESPAÑA”, “Flow International Co.” e “OMAX Co.” nos Estados Unidos. Depois dessa pesquisa tomou-se a decisão de comprar o módulo OMAX 2652A. O módulo foi adquirido mediante Projeto Temático aprovado por FAPESP sob a condição de obter assessoria estrangeira experiente.

A Chefia do PMI - EPUSP decidiu colocá-lo na área central do Laboratório de Mecânica de Rochas. Levando em conta as características do tamanho das partes integrantes, tanto quanto as características de emissão de ruído por tratar-se de jato de água impulsionada a duas vezes a velocidade do som, produzindo aproximadamente 120 dB de ruído em condições de corte ao ar livre e 45 dB efetuando o corte sob leve camada de água. Foi construído o recinto de 6,0 m x 3,75 m para instalação do módulo de corte por jato de água com sistema de paredes duplas para amortecer o ruído da saída da água durante o funcionamento.

O local (Fig. 13) foi provido de sistema de fornecimento de água através de instalação de equipamento destilador de água e duas caixas de propileno para garantir a quantidade e a qualidade apropriada para o funcionamento do equipamento.

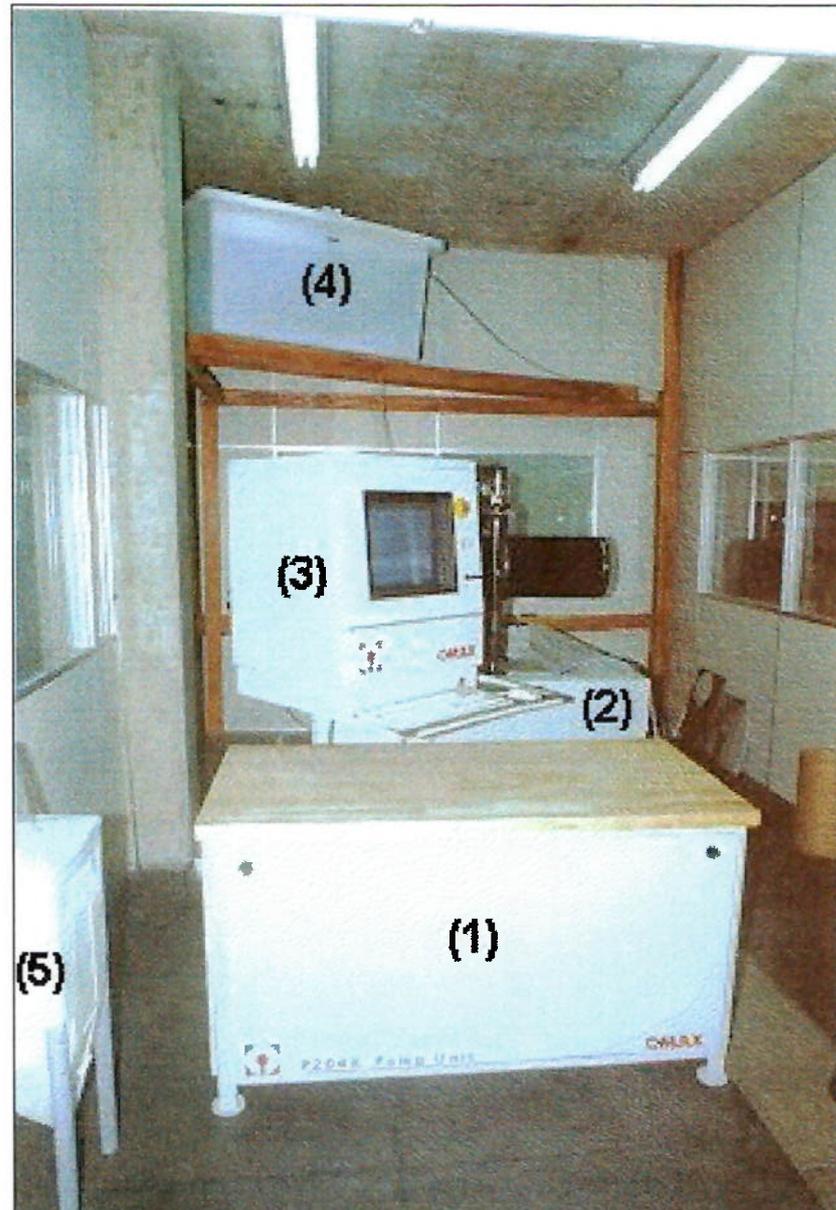


Fig. 13 Local do laboratório de jato abrasivo.

(1) Bomba de alta pressão, (2) Mesa XY com o conjunto do bocal de corte, (3) Computador de comando central do módulo, (4) Caixa de água destilada para o corte, (5) “Dispenser” de abrasivo.

O laboratório de jato de água abrasivo de ultra-alta pressão foi completado com um compressor de ar para suprir energia às válvulas que controlam o fornecimento de abrasivo ao bocal, e com um sistema condicionador de ar para poder trabalhar a portas fechadas.

### 3.3 Descrição do módulo OMAX 2652A

Existem quatro partes principais no sistema de jato abrasivo <sup>50</sup> da OMAX. Estas partes são:

O sistema de controle OMAX <sup>50</sup>: O cérebro do módulo de jato abrasivo OMAX 2652A é um computador provido de software que controla e dirige todas as operações do sistema de jato abrasivo. O software é amigável com comandos para todas as funções, ajuda on-line, importa e edita arquivos “.dxf” criados por outros programas de CAD. As operações da bomba e todos os movimentos do bocal do jato se encontram sob o controle do software. O sistema de controle liga e desliga a bomba d’água segundo a necessidade do fornecimento de água à ultra – alta pressão. Além disso, controla também o movimento do bocal através do caminho desenhado com precisão. O computador é montado dentro de uma cabina a qual fica num suporte metálico com dobradiça que permite afastar o computador (Fig. 13) A cabina protege o computador do pó e da umidade que gera o processo. Membranas transparentes protegem o teclado e o mouse. Na parte frontal do painel de controle se encontram o botão de emergência, a tecla espaço e uma válvula de controle de ar. Os dois controles são utilizados em caso de emergência para parar a máquina. A válvula de ar controla o nível d’água na mesa X-Y. Quando o controle de emergência é utilizado, o sistema perde o ponto de referência de início das operações de corte, por isso o fornecedor aconselha utilizar a barra de espaço do teclado a qual permite parar as funções de corte e continuar uma vez eliminado o problema que motivou a parada.

A bomba de ultra-alta pressão <sup>50</sup>: Esta bomba fornece água em ultra – alta pressão ( $\approx 300$  MPa) ao bocal de corte do módulo. Todas as operações da bomba são controladas pelo sistema de controle OMAX. A bomba de ultra – alta pressão é uma bomba “TRIPLEX” de três êmbolos dirigidos por haste-manivela. A máxima pressão é estabelecida pela válvula de alívio. A válvula é configurada ao sair da fábrica. A bomba é ligada e desligada durante os diversos ciclos da operação de corte e finalmente é desligada quando o trabalho é completado.

A mesa de precisão X-Y <sup>50</sup>: O conjunto da Mesa XY consiste em um tanque d’água que suporta dois eixos rígidos, ou seja, uma ponte no eixo X e uma viga de balanço no eixo Y acima da área de corte que é o tanque d’água. A viga do eixo Y é conectada ao carrinho que se move ao longo do eixo X. Os dois carrinhos dos eixos

X e Y viajam sobre rolamentos lineares de bolas, montados em lados opostos de um tubo cilíndrico. Os carrinhos são movimentados por bolas montadas parafusadas ao longo dos eixos. As bolas são conduzidas por faixas de aço reforçadas e reguladas por servo-motores montados no interior dos tubos. Todos os mecanismos de rolamento e condução estão selados por pulmões de uretano impermeáveis que os preservam da água e das partículas abrasivas. Os servo-motores são motores sem escovas com posição de realimentação. Cada passo do servo-amplificador move o carrinho aproximadamente 0,01 mm possibilitando efetuar o corte de peças com alta precisão e reprodutibilidade. Lâminas de aço colocadas em paralelo fornecem suporte as peças a serem cortadas. A caixa d'água coleta a água e o abrasivo do corte tanto quanto as partículas do material cortado.

O Sistema de Jato Abrasivo<sup>50</sup>: No conjunto do bocal do jato abrasivo a água em ultra – alta pressão, 275 – 300 MPa, é forçada a passar através de um orifício numa jóia de safira ou de rubi (Fig. 6) para formar um estreito jato d'água que flui a 762 m/s. O abrasivo, geralmente mineral de granada, é armazenado num depósito alimentador colocado junto à ferramenta de corte móvel da mesa X-Y. Uma válvula controlada por ar comprimido regula a saída do fluxo de abrasivo até o bocal. A forte corrente do jato causa sucção de ar e abrasivo que se misturam na câmara de mistura, antes do tubo focalizador (construído de carbetto de tungstênio), formando um feixe que origina o jato abrasivo. O feixe de água + ar + abrasivo sai do tubo de mistura a 300 m/s sendo direcionado sobre o material a ser cortado. Cria-se assim, o jato de água abrasivo de ultra-alta pressão capaz de cortar grande variedade de materiais de engenharia.

O jato lança as partículas de abrasivo contra o material alvo, atravessando-o numa trajetória reta no início e posteriormente curvada por causa da velocidade de translação da ferramenta de corte ou bocal do jato, e a força centrífuga resultante atuando sobre as partículas as empurra contra o material cortando a peça desenhada (Fig. 14).

A ação de corte é produzida pelo processo abrasivo, onde as forças e movimentos são fornecidos pela água. O processo de corte com jato abrasivo não produz rebarba. As peças podem ser utilizadas imediatamente depois de produzidas.

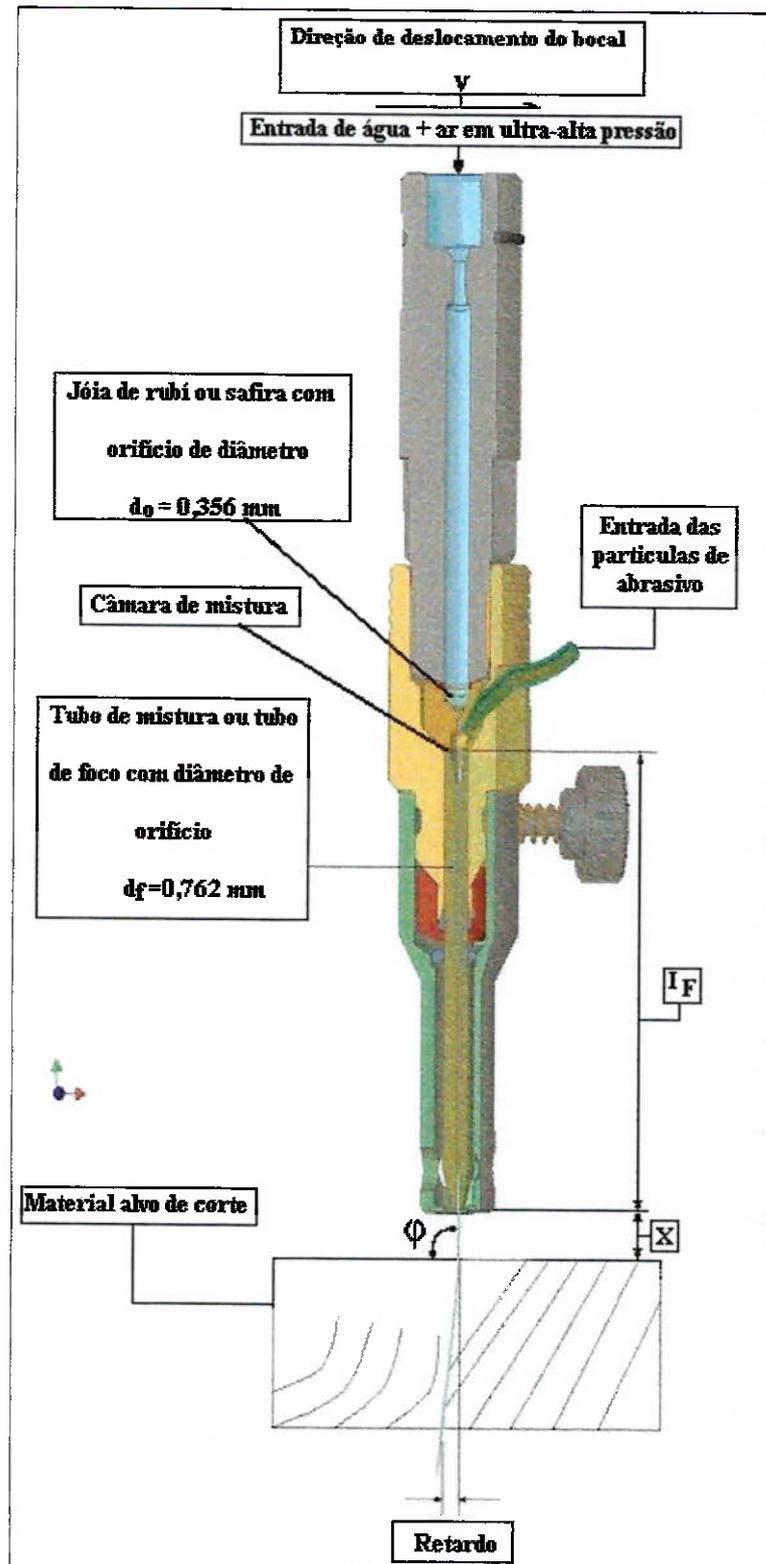


Fig. 14 Corte de bocal de jato abrasivo e do material alvo.

O caminho e a velocidade do bocal de corte são calculados com muito cuidado, levando em conta às características do material a ser cortado e o desenho da peça, com uma resolução de 5.000 pontos/cm antes de efetuar o corte. Isso permite controlar com precisão a velocidade de deslocação do jato para alisar o corte da peça, ainda dentro da operação de corte. O sistema de jato abrasivo da OMAX permite passar rapidamente do desenho à produção da peça terminada, tanto para uma peça quanto para grandes volumes de peças. Com uma configuração apropriada o sistema de jato abrasivo OMAX permite cortar com precisão de até  $\pm 0,1$  mm.

A mistura abrasiva sai do bocal aproximadamente a velocidade do som, por isso quando o corte é feito no ar, o nível de ruído pode ser maior que 120 dB. Porém, quando o corte se efetua sob leve camada d'água, o nível de ruído desce até 45 dB.

### 3.4 O processo de criação da peça

No módulo de jato abrasivo da OMAX existem três etapas principais para fabricar uma peça:

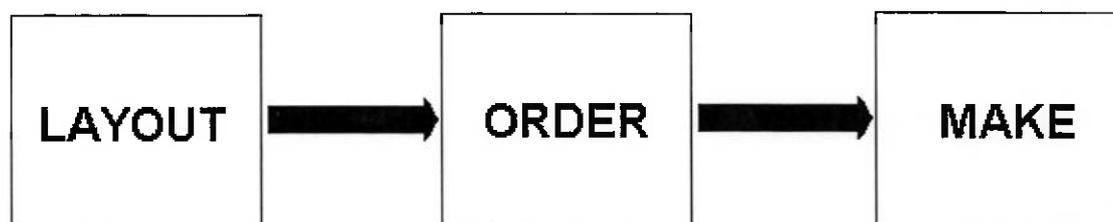


Fig. 15 Etapas principais na criação de uma peça no jato abrasivo da OMAX <sup>50</sup>

As três etapas correspondem aos três programas ou comandos de informática que se utilizam para criar uma peça. Os nomes desses programas estão dentro dos quadros da Fig. 15.

O programa Layout é um programa CAD que permite desenhar a peça utilizando formas básicas como retângulos, círculos, e linhas retas. Depois, o operador seleciona a qualidade de corte ("Quality": velocidade de translação do bocal, também denominada velocidade de corte) para cada segmento do desenho. Como regra geral, para obter maior qualidade no acabamento da peça, deve-se aplicar menor velocidade no bocal.

Depois de terminado o desenho da peça é utilizado o comando Order para determinar o caminho da ferramenta. No Order o operador pode decidir por qual lado, interior ou exterior à linha do desenho, o corte vai ser efetuado.

Finalmente, se passa ao programa Make para fazer a peça. Neste são

especificados o material a ser cortado e a espessura do mesmo. Make controla o movimento do jato abrasivo. Antes de começar o corte, o programa determina como será produzida a peça, qual será o tempo de corte, e qual será a quantidade de abrasivo que será utilizado. O consumo regular de abrasivo no módulo de Jato de água abrasivo OMAX 2652A é de 5,3 g/s, e a vazão de água é de 3,08 L/min.<sup>50</sup>

Durante o processo de criação da peça é possível determinar a qualidade de cada parte do desenho, para isso o programa Layout oferece nove qualidades<sup>50</sup> diferentes de corte que são:

**T** – Traverse: É o comando aplicado às linhas do desenho nas quais não será efetuado nenhum corte, ou seja, as linhas de deslocamento da ferramenta de corte entre os pontos de corte. Na tela do computador central do módulo de jato abrasivo as linhas com T estarão desenhadas na cor verde.

**1, 2, 3, 4, 5:** São cinco qualidades (ou velocidades) de corte do jato abrasivo. 1 é a maior velocidade de corte porém de menor qualidade no acabamento das bordas da peça. 5 é a menor velocidade e a maior qualidade no acabamento das bordas da peça. Na tela do computador, as cores das linhas do desenho projetado variam segundo o número ou qualidade selecionado. Após o operador determinar a qualidade de corte, o programa Make calcula a velocidade correspondente à dita qualidade.

A qualidade “e” (Etch), movimentará o bocal na velocidade especificada pelo operador. Projetada pelo fabricante para gravar no material alvo, pode ser empregada para cortar as peças mais espessas e de materiais mais duros ao permitir selecionar a velocidade de corte e efetuar repetições ou passos de corte sobre as mesmas linhas.

**S** é a qualidade projetada pelo fabricante para escrever textos.

**W** é qualidade para utilizar somente jato d’água pura, sem abrasivos.

A velocidade de corte afeta diretamente o acabamento das bordas das peças. É possível verificar isso quando são cortados materiais espessos com diferentes velocidades. Nas bordas das peças cortadas é possível ver o corte liso até determinada profundidade, começando logo o corte rugoso a determinada profundidade do corte. Quanto maior for a espessura, maior será a rugosidade. Estes aspectos são mais destacados quando são cortados materiais friáveis tais como rochas, por exemplo: granito e mármore. Isto é objeto de discussão do presente trabalho.

A tecnologia de corte com jato d'água e abrasivo pode ser aplicada ao corte de materiais cortando o material com um único passo ou por múltiplos passos do bocal por todo o caminho do desenho. Segundo o método de corte a aplicar, para determinar a qualidade do corte é importante conhecer o tipo de material a ser cortado. No caso de aplicar o método de corte por passo singelo o tipo de material determina o Número de Maquinalidade <sup>51</sup> (coeficiente que consta no software da OMAX) a introduzir no Make para que o programa possa calcular a velocidade de translação, tempo e quantidade de abrasivo que será consumida durante o corte. No caso de aplicar o método de corte por múltiplos passos, a determinação da velocidade e do número de passos depende da experiência do operador.

No método de corte por passo singelo o início da operação de corte é marcado pelo denominado “wiggles” (em português: meneio), ou seja, a oscilação horizontal do bocal controlada pelo Make no início do corte para atravessar a espessura do material a ser cortado, para depois continuar a cortar a peça desenhada. O “wiggles” permite que cada partícula abrasiva bata no material a cortar 0,1 mm longe da partícula anterior, evitando que as partículas impactem entre elas afetando a operação de atravessar o material.

### **3.5 Preparo de corpos de prova**

O presente trabalho dedica-se a aprofundar linha de pesquisa iniciada na pesquisa de Mestrado citada, que efetuou ensaios de corte utilizando um único passo da ferramenta de corte em corpos de prova com espessura máxima de 69 mm (granito) e 60 mm (mármore).

O presente trabalho dedica-se a avaliar o efeito do corte em rochas de maior espessura utilizando os métodos de corte de passo singelo e de múltiplos passos. Por isso, se utilizaram os mesmos tipos petrográficos de rochas e os corpos de prova possuem igual forma, porém a espessura dos blocos a ensaiar é maior de 69 mm e menor de 140 mm.

Os corpos de prova a ensaiar, foram configurados em amostras de rochas das variedades descritas no início deste capítulo. Utilizou-se serra diamantada do LMR – PMI – EPUSP na configuração destes corpos de prova (Fig. 16). A Tabela 8 relaciona os corpos de prova e as dimensões correspondentes de cada um deles.

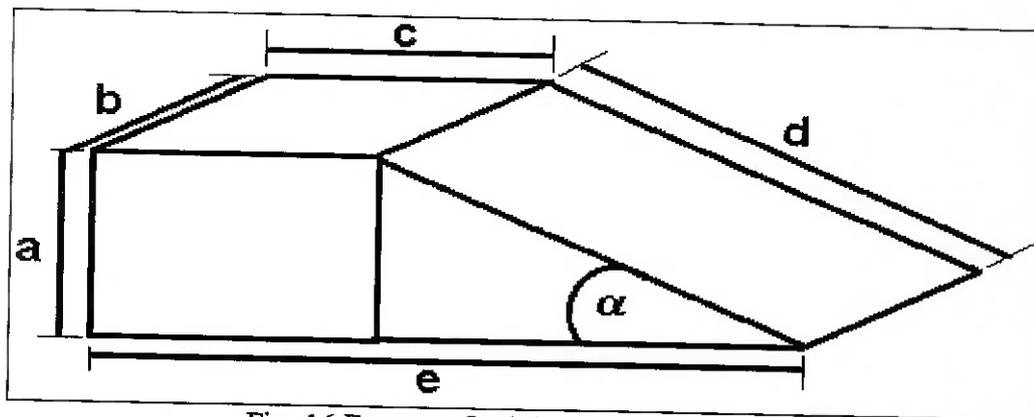


Fig. 16 Formato final dos corpos de prova.

O formato em cunha dos corpos de prova permite a análise do corte em profundidade variável segundo as profundidades atingidas pelos cortes liso e total.

Tabela 8. Ensaio e dimensões dos corpos de prova (em mm e graus)

Ensaio Nº	Método	Rocha/CP	a	b	c	d	e	$\alpha^{\circ}$	Nº de linhas
1	MP	GPP/1	75	105	90	174	250	28	6
2	MP	GVCB/1	87	150	120	144	250	40	6
3	PS	GPP/2	130	130	110	165	250	54	2
4	MP	GPI/1	134	130	121	180	242	48	6
5	PS-MP	MBCJ/1	120	116	117	144	196	56	6
6	PS-MP	MBCJ/2	130	116	114	144	196	57	9
7	MP	GPP/2a	130	129	110	164	209	52	7
	MP	GPP/3	136	133	105	182	230	47	14
8	MP	GPI/2	133	116	134	180	250	47	9
9	MP	GVCB/2	115	130	100	173	227	41	6
	MP	GVCB/3	113	110	100	179	210	41	3

Nota: PS – passo simples e MP – múltiplos passos.

O material para configurar os corpos de prova foi coletado diretamente nas cavas<sup>52</sup> das jazidas em atividade.

### 3.6 Parâmetros do processo de corte por jato de água abrasivo.

O corte através do jato d'água abrasivo envolve vários parâmetros que determinam diretamente: eficiência, economia e qualidade do corte. Esses parâmetros foram agrupados em: parâmetros hidráulicos, parâmetros de corte, parâmetros de mistura e aceleração e parâmetros do abrasivo, (Tabela 9).

Tabela 9 Parâmetros do processo e simbologia <sup>53</sup>.

Parâmetros	Componentes
Hidráulicos	Pressão da bomba (p)
	Fluxo de água (Q <sub>w</sub> )
	Diâmetro do orifício da jóia (d <sub>0</sub> )
de Corte	Velocidade do bocal (V)
	Número de passos (N <sub>p</sub> )
	Distância de afastamento (x)
	Ângulo de impacto (φ)
de Mistura e Aceleração	Diâmetro de foco (d <sub>F</sub> )
	Comprimento do bocal (I <sub>F</sub> )
do Abrasivo	Fluxo de massa (mA)
	Diâmetro da partícula (dp)
	Distribuição granulométrica [f(dp)]
	Formato da partícula
	Dureza (Hp)

Explicação destes parâmetros é apresentada logo abaixo:

Pressão da bomba (p) — A pressão da bomba exerce influência direta sobre a eficiência do corte. A maior pressão, maior será a velocidade do jato e, conseqüentemente, maior a profundidade de corte obtida <sup>53</sup>. A pressão d'água na ferramenta de corte, medida em manômetro próprio do módulo da OMAX durante os ensaios efetuados foi aproximadamente 290 MPa. O uso da jóia influi sobre a pressão do jato. Maior tempo de uso, significa maior desgaste, e menor possibilidade de atingir a capacidade máxima de pressão do módulo. Também influi a manutenção e limpeza da bomba.

Diâmetro do orifício da jóia (d<sub>0</sub>) — O diâmetro do orifício da jóia determina o fluxo d'água (Q<sub>w</sub>), valor que influencia a eficiência e a profundidade de corte. Durante o experimento se utilizou, jóia com orifício de diâmetro de 0,356 mm.

Número de passos (np) — Quantidade de repetições do caminho de corte pelo bocal. Os corpos de prova foram cortados pelos métodos de passo único e de múltiplos passos.

Distância de afastamento (x) — Distância entre o orifício de saída do bocal e

o material a ser cortado (vide Figura 14). O valor utilizado nos ensaios foi aproximadamente de 3 mm. Valores maiores produzem uma dispersão acentuada do jato, com conseqüente perda de energia e precisão. Por outro lado, valores muito pequenos não são aconselháveis, pois o bocal pode ser danificado devido a eventuais irregularidades da superfície do material a ser cortado <sup>50</sup>. Para a regulação da distância de afastamento, utilizou-se o método padrão orientado pela OMAX <sup>50</sup> para a operação do módulo de jato abrasivo. Com a trava de segurança do movimento vertical da ferramenta de corte solta, se gira a manivela até encostar o bocal sobre a superfície superior da peça alvo de corte, a seguir se gira a própria manivela, duas voltas em sentido contrário, obtendo assim a separação necessária para obter um jato de largura apropriada e não afetar a ferramenta de corte.

Ângulo de impacto ( $\phi$ ) — No presente trabalho, por efetuar o corte em materiais friáveis, como no caso das rochas ornamentais, o ângulo de impacto utilizado nos ensaios foi o perpendicular  $\phi = 90^\circ$  mesmo utilizado na dissertação citada <sup>2</sup> e que segundo diversos pesquisadores <sup>53</sup> produz a maior profundidade de corte.

Diâmetro de foco ( $d_F$ ) — Corresponde, ao valor do diâmetro do bocal. Existe a possibilidade de variação deste valor, através da utilização de bocais de diferentes diâmetros. Em todos os ensaios deste trabalho, utilizou-se sempre bocal de 0,762 mm de diâmetro.

Comprimento do foco ( $I_F$ ) — É o comprimento do tubo focalizador: 110 mm.

Parâmetros do abrasivo. O abrasivo utilizado durante todo o experimento foi o mineral natural granada, granulometria #80. O material, foi comprado na empresa Flow Latino-Americana Ltda que o importou da Índia. Parâmetros intrínsecos ao abrasivo utilizado, como o diâmetro da partícula ( $d_p$ ), a sua distribuição granulométrica [ $f(d_p)$ ], o formato da partícula e a dureza ( $H_p$ ) foram estudados em trabalhos do autor desta Tese <sup>54, 55</sup> e de integrantes do “Grupo de Pesquisa em Jato d’água Abrasivo do PMI – EPUSP” apresentado em evento Internacional em Atenas durante o ano 2000. Nesse artigo são fornecidas características de outros abrasivos que podem ser utilizados no processo, incluindo um mineral de granada brasileiro obtido através do re-processamento de colas do beneficiamento das areias monazíticas da NUCLEMON.

O único parâmetro do abrasivo que depende do equipamento utilizado é o fluxo de massa (mA). Trata-se da quantidade em peso do abrasivo incorporado ao jato d'água num determinado período de tempo. A quantidade total de abrasivo utilizada em cada ensaio é calculada automaticamente pelo software MAKE da OMAX ainda antes de iniciar o processo de corte. Por medições efetuadas, determinou-se que o valor médio do fluxo de massa do abrasivo utilizado é 5,3 g/s.<sup>56</sup>

### 3.7 Ensaio de corte

Os corpos de prova foram dispostos na mesa XY segundo ilustra a Fig. 10, abaixo.

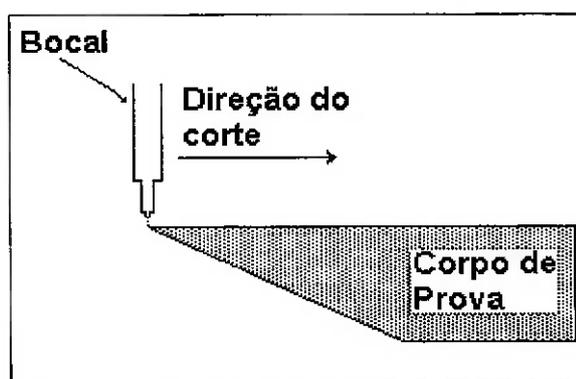


Fig. 17 Disposição dos corpos de prova para ensaio de corte retilíneo.

Na Fig. 17 pode-se comprovar como 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.

No software da OMAX foi desenhado um gabarito de corte no qual foram desenhadas linhas retas, paralelas, de 200 mm de comprimento para os ensaios de corte. Para fornecer à máquina os elementos necessários para o programa, foram adicionados mais 40 mm na parte superior de cada linha, mas não para serem cortados. As linhas desenhadas foram unidas para constituir um trajeto fechado possibilitando a repetição do mesmo corte no passo seguinte. Tudo isso foi feito, com o intuito de poder efetuar o corte pelo método de passos múltiplos. Para isso foi escolhida a qualidade de corte “e” (Edge) onde a velocidade de corte é constante, e, o número de passos do bocal pode ser selecionado.

Normalmente o software MAKE calcula a velocidade do bocal levando em consideração os parâmetros do processo, o número de maquinabilidade do material a ser cortado (caso de aplicação do método de corte por simples passo do bocal), a espessura do material e a qualidade de corte desejada, além da geometria do corte. O

MAKE aplica a relação inversa que existe entre a espessura do material a ser cortado e a velocidade do bocal que será utilizada na qual:  $v = 1/T^{1,15}$   
onde: T é a espessura do material alvo de corte <sup>53</sup>.

É preciso esclarecer que a velocidade calculada pelo software utilizada pela máquina pode variar automaticamente durante o processo, dependendo da geometria do corte. Por exemplo, o software diminui a velocidade do bocal antes de executar, uma curva. Esse processo é necessário para que a parte final do jato possa sempre acompanhar o seu início pois há um retardo (vide Fig. 7). Em cortes retilíneos não há variação de velocidade. Como regra, quanto menor for a velocidade do bocal, maior será a qualidade do acabamento da superfície do material alvo <sup>50, 53</sup>.

Como resultado principal do trabalho anterior <sup>2</sup> pôde se concluir que o sulco, produto do corte na rocha, apresentava características no acabamento das paredes, determinadas pela rugosidade em função da profundidade, que determinaram a necessidade de aprofundar a pesquisa de aplicação do jato abrasivo no corte de corpos de prova de rocha de maior espessura.

Estas características mostravam, em função da profundidade, uma região de corte liso e corte rugoso. Assim, nos vários ensaios efetuados, apresenta-se corte liso até profundidade 13 – 18 mm quando utilizada a qualidade 1, e até 31 – 38 mm quando se utiliza a qualidade 5. Isto é conseqüente com o que foi mencionado anteriormente sobre a relação entre qualidade e velocidade de translação do jato abrasivo.

Durante os ensaios efetuados na presente pesquisa, foi utilizada fundamentalmente a qualidade de corte “Edge (e)”, para determinar a velocidade de corte e quantidade de passos do bocal. Assim, foi analisada a velocidade calculada pelo MAKE para as qualidades de corte 3 ou 5, (intermédia e máxima), logo na qualidade “e”, foram selecionadas as velocidades de corte, e o número de passos. Portanto, as velocidades de translação do bocal e número de passos foram parâmetros variáveis, enquanto permaneciam fixos o fluxo de abrasivo, e a pressão da bomba durante os ensaios da pesquisa.

Nos ensaios 1, 2, 4 e 5 com granitos se manteve fixa a relação da velocidade  $V(\text{mm/s})/N_p(\text{número de passos})$ . Aplicaram-se as combinações: 2/2, 4/4, 8/8, 16/16, 32/32 e 64/64. No mármore, por sua menor dureza e ser de caráter monomineral,

aplicaram-se: 1/1, 4/2, 8/4, 16/8, 32/16 e 64/32,. O limite de 64 mm/s foi escolhido como velocidade máxima devido a que a velocidade de translação máxima da máquina é: 76 mm/s. Depois, para comprovar se a repetição dos passos aprofundava o corte foram efetuados ensaios com V fixa e Np variável:

- a) Ensaio 6 em mármore segundo plano de cortes (Fig. 18) conseguindo as combinações V/Np mostradas nas Fig. 19 e 20, e,
- b) Ensaios 7, 8 e 9 nos granitos, segundo o plano de cortes (Fig. 21) conseguindo as combinações V/Np mostradas nas Fig. 22 e 23.

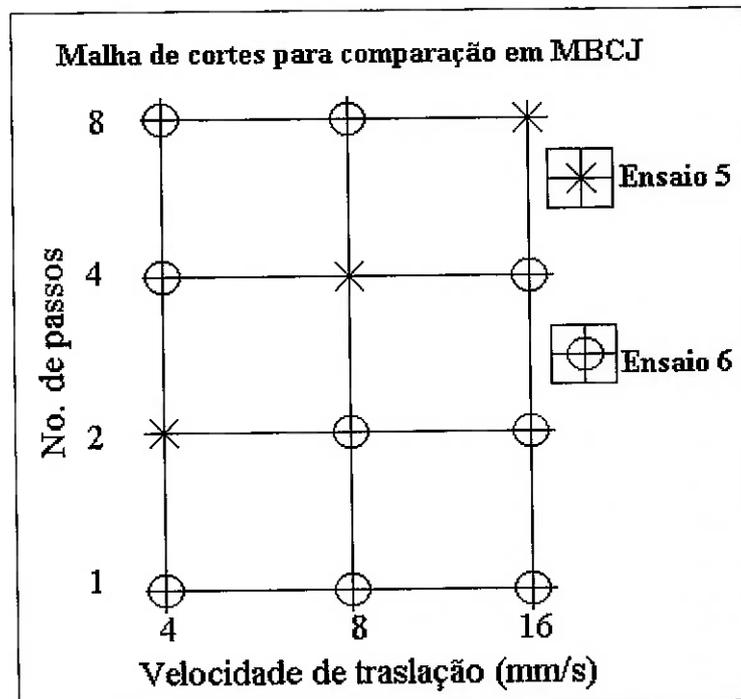


Fig. 18 Esquema das principais combinações de V/Np em mármore.

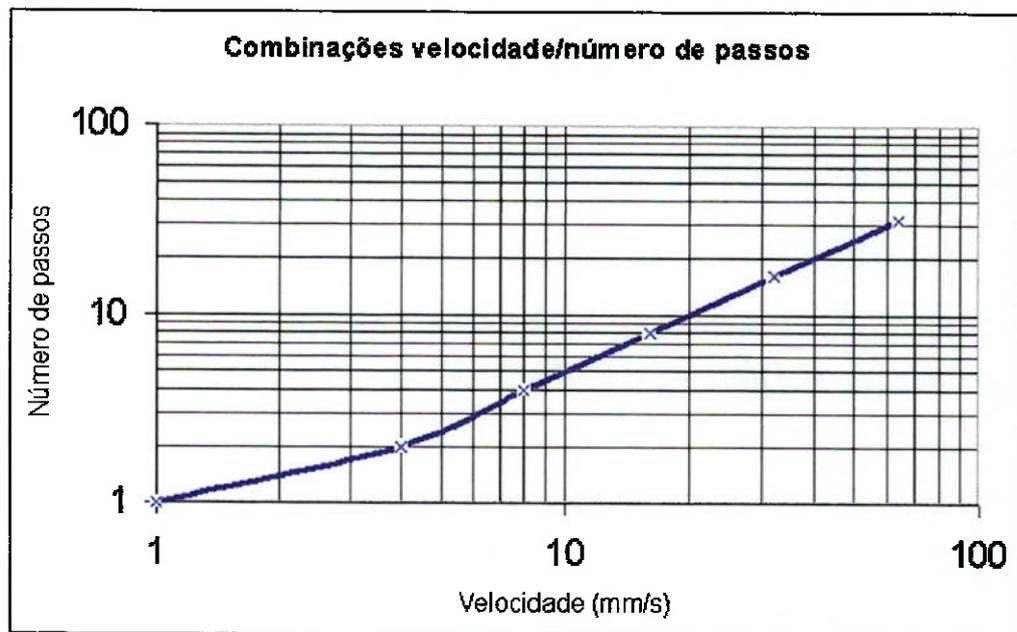


Fig. 19 Curva da relação  $V/N_p$  para o ensaio 5 em mármore MBCJ.

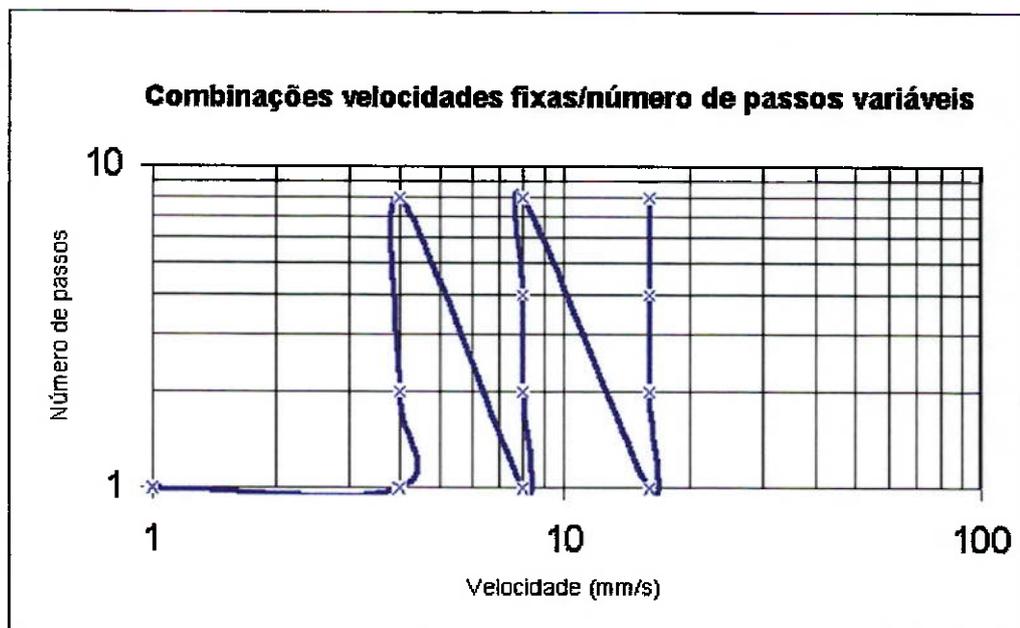


Fig. 20 Curva da relação  $V(\text{fixas})/N_p(\text{variáveis})$  para o ensaio 6 em mármore MBCJ.

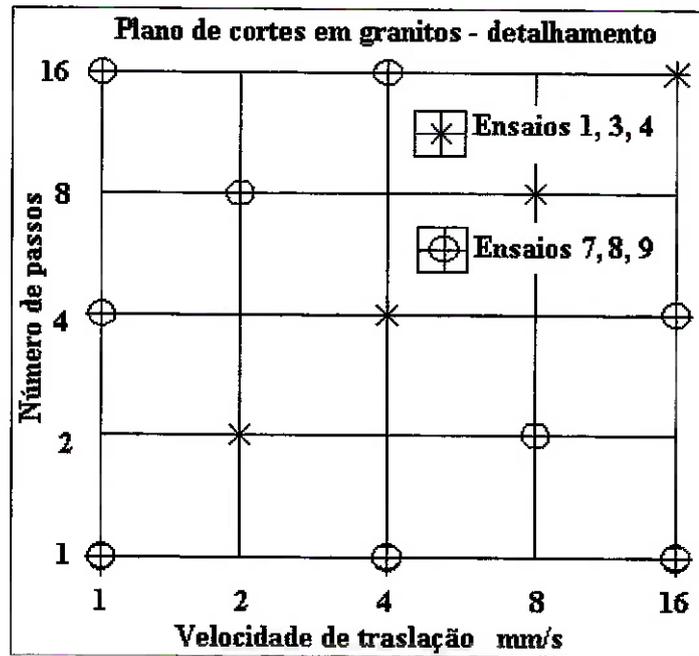


Fig. 21 Esquema das principais combinações de V/Np em granitos

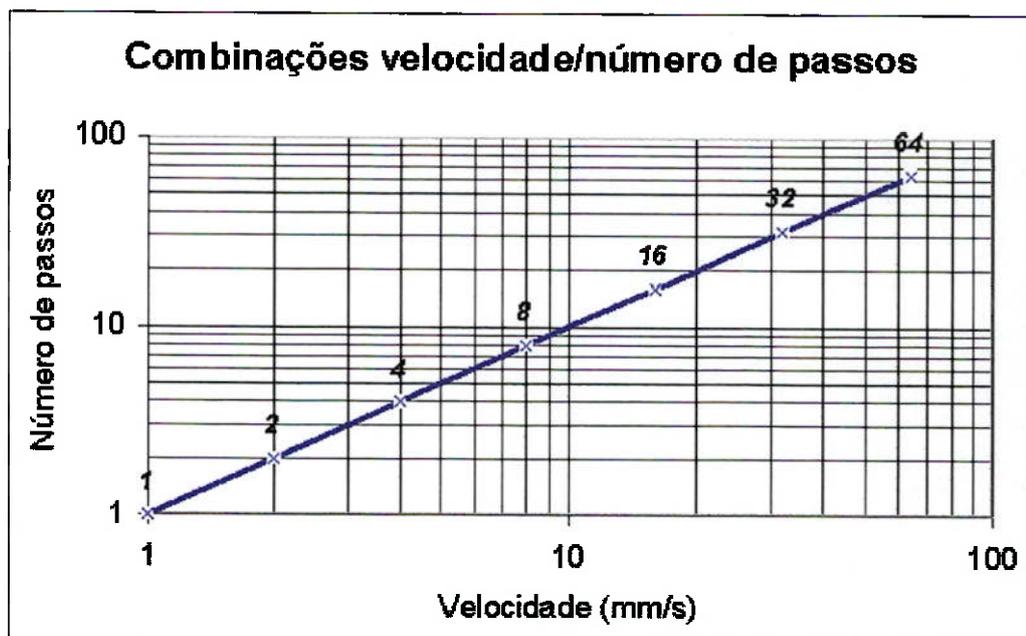


Fig. 22. Curva da relação V/Np para os ensaios 1, 3, 4 em granitos.

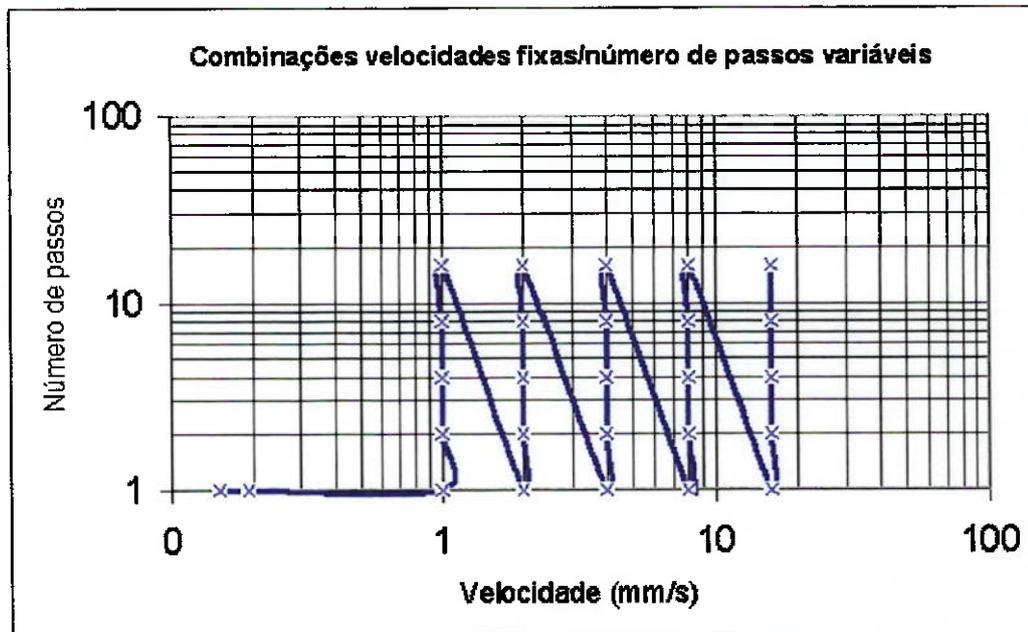


Fig. 23 Curva da relação  $V(\text{fixas})/N_p(\text{variáveis})$  para os ensaios 2, 7, 8, 9 também em granitos.

Para todos os ensaios da pesquisa (Tabelas 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, e 18) foram mantidos invariáveis os parâmetros: Comprimento de corte 200,00 mm; pressão do jato: 290 MPa; fluxo de abrasivo 5,3 g/s; vazão de água 3,08 L/min<sup>50</sup> (0,05133 L/s).

Tabela 10. Ensaio Número 1. Granito preto Piracaia. CP 1.

Linha Nº	Velocidade (mm/s)	Passos Nº	TUC (s)	TTC (s)	Abrasivo (kg)	Água (L)
1	2	2	100	200	0,5	10,27
2	4	4	50	200	0,3	10,27
3	8	8	25	200	0,1	10,27
4	16	16	12,5	200	0,1	10,27
5	32	32	6,25	200	0,0	10,27
6	64	64	3,13	200	0,0	10,27

Tabela 11. Ensaio Número 2. Granito vermelho Capão Bonito CP1

Linha Nº	Velocidade (mm/s)	Passos Nº	TUC (s)	TTC (s)	Abrasivo (kg)	Água (L)
1	2	2	100	200	1,06	10,27
2	4	4	50	200	1,06	10,27
3	8	8	25	200	1,06	10,27
4	16	16	12,5	200	1,06	10,27
5	32	32	6,25	200	1,06	10,27
6	64	64	3,13	200	1,06	10,27

Tabela 12. Ensaio Número 3. Granito preto Piracaia CP2

Linha Nº	Velocidade (mm/s)	Qualidade	Nº Passos	TTC (s)	Abrasivo (kg)	Água (L)
*1	0,192	5	1	1055	5,8	54,16
2	0,150	etch	1	2018	11,1	103,59

\*Número de maquinaalidade \*: granito: 322.

Tabela 13. Ensaio Número 4. Granito prata Interlagos CP-1

Linha Nº	Velocidade (mm/s)	Passos Nº	TUC (s)	TTC (s)	Abrasivo (kg)	Água (L)
1	2,00	2	100	200	1,06	10,27
2	4,00	4	50	200	1,06	10,27
3	8,00	8	25	200	1,06	10,27
4	16,00	16	12,5	200	1,06	10,27
5	32,00	32	6,25	200	1,06	10,27
6	64,00	64	3,13	200	1,06	10,27

Tabela 14. Ensaio Número 5. Mármore branco Mantiqueira CP-1

Linha Nº	Velocidade (mm/s)	Passos Nº	TUC (s)	TTC (s)	Abrasivo (kg)	Água (L)
1	1,00	1	200	200	1,06	10,27
2	4,00	2	50	100	0,53	5,13
3	8,00	4	25	100	0,53	5,13
4	16,00	8	12,5	100	0,53	5,13
5	32,00	16	6,25	100	0,53	5,13
6	64,00	32	3,125	100	0,53	5,13

Tabela 15. Ensaio Número 6. Mármore branco Mantiqueira CP-2

Velocidades fixas e número de passos variável.

Linha Nº	Velocidade (mm/s)	Passos Nº	TUC (s)	TCT (s)	Abrasivo (kg)	Água (L)
1	4,00	1	50	50	0,27	2,57
2	4,00	4	50	200	1,06	10,27
3	4,00	8	50	400	2,12	20,53
4	8,00	1	25	25	0,13	1,28
5	8,00	2	25	50	0,27	2,57
6	8,00	8	25	200	1,06	10,26
7	16,00	1	12,5	12,5	0,07	0,64
8	16,00	2	12,5	25	0,13	1,28
9	16,00	4	12,5	50	0,27	2,57

Tabela 16. Ensaio Número 7. Granito preto Piracaia CP-2 e CP-3.

Velocidades fixas e número de passos variável

Linha No.	Velocidade (mm/s)	Passos Nº	TUC (s)	TTC (s)	Abrasivo (kg)	Água (L)
1	1	1	200	200	1,06	10,27
2	1	2	200	400	2,12	20,53
3	1	4	200	800	4,24	41,07
4	1	8	200	1600	8,48	82,13
5	1	16	200	3200	16,96	164,27
6	2	1	100	100	0,53	5,13
**7	2	2	100	200	1,06	10,27
8	2	4	100	400	2,12	20,53
*9	2	8	100	800	4,24	41,07
*10	2	16	100	1600	8,48	82,13
11	4	1	50	50	0,27	2,57
12	4	2	50	100	0,53	5,13
**13	4	4	50	200	1,06	10,27
14	4	8	50	400	2,12	20,53
15	4	16	50	800	4,24	41,07
16	8	1	25	25	0,13	1,28
17	8	2	25	50	0,27	2,57
18	8	4	25	100	0,53	5,13
**19	8	8	25	200	1,06	10,27
20	8	16	25	400	2,12	20,53
21	16	1	12,5	12,5	0,07	0,64
22	16	2	12,5	25	0,13	1,28
23	16	4	12,5	50	0,27	2,57
24	16	8	12,5	100	0,53	5,13
**25	16	16	12,5	200	1,06	10,27

\* Linhas que atravessam eventualmente o corpo de prova em intervalos irregulares.

\*\* Linhas interpoladas do ensaio 1 anterior.

Tabela 17. Ensaio Número 8. Granito prata Interlagos CP-2.

Velocidades fixas e número de passos variável

Linha No.	Velocidade (mm/s)	Passos N°	TUC (s)	TTC (s)	Abrasivo (kg)	Água (L)
1	1	1	200	200	1,06	10,27
*2	1	4	200	800	4,24	41,07
3	1	16	200	3200	16,96	164,27
**4	2	2	100	200	1,06	10,27
5	2	8	100	800	4,24	41,07
6	4	1	50	50	0,27	2,57
**7	4	4	50	200	1,06	10,27
*8	4	16	50	800	4,24	41,07
9	8	2	25	50	0,27	2,57
10	8	8	25	200	1,06	10,27
11	16	1	12,5	12,5	0,07	0,64
12	16	4	12,5	50	0,27	2,57
**13	16	16	12,5	200	1,06	10,27

\* Linhas que atravessam eventualmente o corpo de prova em intervalos irregulares.

\*\* Linhas de testes anteriores interpoladas.

Tabela 18. Ensaio Número 9. Granito vermelho Capão Bonito CP-2 e CP-3.

Velocidades fixas e número de passos variável.

Linha No.	Velocidade (mm/s)	Passos Nº	TUC (s)	TEC (s)	Abrasivo (kg)	Água (L)
1	1	1	200	200	1,06	10,27
2	1	2	200	400	2,12	20,53
*3	1	4	200	800	4,24	41,07
4	1	8	200	1600	8,48	82,13
**5	1	16	200	3200	16,97	164,27
6	2	1	100	100	0,53	5,13
7	2	2	100	200	1,06	10,27
8	2	4	100	400	2,12	20,53
*9	2	8	100	800	4,24	41,07
10	2	16	100	1600	8,48	82,13
11	4	1	50	50	0,27	2,57
12	4	2	50	100	0,53	5,13
13	4	4	50	200	1,06	10,27
14	4	8	50	400	2,12	20,53
*15	4	16	50	800	4,24	41,07
16	8	1	25	25	0,13	1,28
17	8	2	25	50	0,27	2,57
18	8	4	25	100	0,53	5,13
19	8	8	25	200	1,06	10,27
20	8	16	25	400	2,12	20,53
21	16	1	12,5	12,5	0,07	0,64
22	16	2	12,5	25	0,13	1,28
23	16	4	12,5	50	0,27	2,57
24	16	8	12,5	100	0,53	5,13
25	16	16	12,5	200	1,06	10,27

\*Linhas que atravessam o CP em intervalos prolongados. Destaca-se a linha cortada segundo a combinação 4/16 pois parou em 113,36 mm de profundidade, a somente 0,64 mm de atravessar o corpo de prova. \*\* Linha que atravessa o CP totalmente.

### 3.8 Métodos de avaliação do acabamento da superfície

Para obter os dados e determinar os parâmetros de otimização do processo, os corpos de prova submetidos ao corte por jato d'água abrasivo, foram medidas as magnitudes externas das áreas de corte liso e de corte total. A seguir, utilizando métodos trigonométricos simples foram calculadas as alturas correspondentes às áreas de corte: liso e rugoso.

Os parâmetros geométricos do corte, obtidos desta forma, são apresentados no capítulo sobre resultados para a análise e comparação. Os parâmetros geométricos de corte a medir nos corpos de prova são apresentados nos dois itens seguintes.

#### 3.8.1 Avaliação do afunilamento do corte.

Para avaliar o afunilamento do corte é preciso medir a Largura do sulco no topo do corte ( $L_T$ ) e a largura do sulco na face inferior do corte ( $L_B$ )<sup>53</sup>.

A largura do sulco no topo do corte ( $L_T$ ) é a distância entre as paredes da ranhura de corte no plano superior do corpo de prova que corresponde com a entrada do jato abrasivo no corpo de prova. A largura do sulco na face inferior do corte ( $L_B$ ) corresponde à saída do jato do corpo de prova. Como se mostra nas fotos do capítulo Resultados, a entrada apresenta largura praticamente homogênea em todo o comprimento do sulco. A saída em todos os casos, apresenta diferentes larguras ao longo do sulco, sobretudo nos casos das saídas correspondentes com áreas de corte rugosos. Por isso, o valor destas larguras foi determinado para cada corpo de prova, após dividir a entrada e a saída em três áreas de valores parecidos ou aproximados.

Assim, a análise destes dois valores permitiu definir as variações da largura entre a entrada do jato no topo dos corpos de prova e a saída. No caso da pesquisa anterior<sup>2</sup>, com corpos de prova menos espessos e corte efetuado com único passo do bocal foi determinado o afunilamento convergente ( $T_R$ ) do sulco no sentido da entrada para a saída do jato abrasivo. O valor de  $T_R$  se determina como o quociente resultante entre  $L_T$  e  $L_B$  ( $T_R = L_T / L_B$ ). Em todas as experiências da pesquisa<sup>2</sup> citada, resultou que  $T_R > 1$ , pois sempre  $L_T > L_B$ . A pesquisa concluiu que a largura da ranhura diminui na medida em que atravessa o corpo de prova. Ver Fig. 24. No presente trabalho, é determinado o comportamento do afunilamento na aplicação do método de corte com múltiplos passos em corpos de espessuras maiores de 69 mm e menores de 200 mm, no corte liso e no corte rugoso.

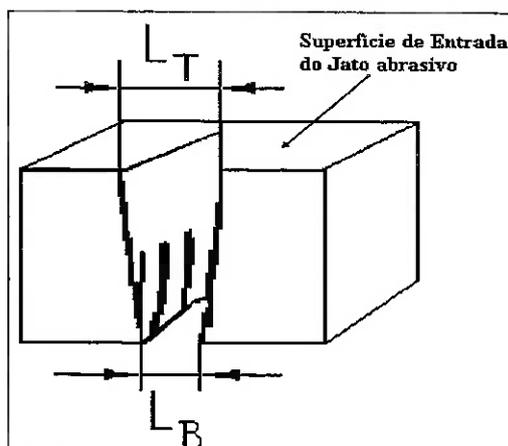


Fig. 24 Afunilamento convergente do sulco. <sup>2, 31, 53</sup>

### 3.8.2 Altura do corte liso ( $h_{\text{liso}}$ ), e altura do corte total ( $h$ ).

A superfície dos materiais cortados através de jato d'água abrasivo apresenta duas regiões distintas: uma região de corte liso, na parte superior, e outra região de corte rugoso, na parte inferior da superfície. Esta última é marcada pela presença de estrias. Com o aumento da profundidade as estrias aumentam o comprimento de onda passando gradualmente ao que chamamos de corte ondulado. No trabalho anterior <sup>2</sup> analisaram-se as causas da geração de estrias durante o corte com jato abrasivo que resumindo devem-se à instabilidade do jato de alta energia, as variações do fluxo de abrasivo e ao aumento da espessura do material alvo de corte. A presente pesquisa se propusera continuar a estudar e avaliar os cortes lisos e rugosos, tentando definir com maior precisão os seus limites. A Fig. 25 mostra as alturas do corte liso e do rugoso. Também mostra os métodos de corte por passo simples e por múltiplos passos.

Um dos métodos para avaliar a qualidade do corte é medir as áreas de corte liso, e de corte rugoso e compara-las entre si levando em conta a velocidade do bocal com que foram cortadas.

Na pesquisa anterior calcularam-se as dimensões das áreas de corte tomando a medida do comprimento do corte liso na rampa do corpo de prova ( $X$ ), e determinando a altura do corte liso por simples cálculo trigonométrico.

Neste trabalho, calcularam-se as alturas das diferentes regiões do corte pelo mesmo método. Na presente pesquisa, dada a maior espessura dos corpos de prova as estrias passam gradualmente á ondulações. Pelos métodos disponíveis não é possível determinar quando as estrias passam a ondulações.

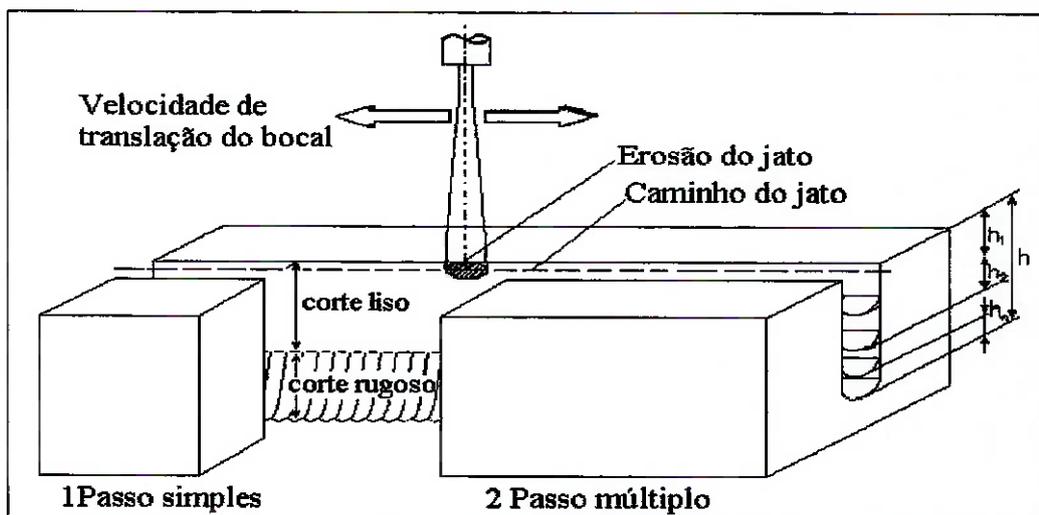


Fig. 25 Alturas de corte liso e rugoso no sulco. <sup>27, 41</sup>

### 3.8.3 Medidas de rugosidade

Como foi explicado no capítulo Generalidades a avaliação de rugosidade ou rugosimetria foi efetuada no “DIGITA – Dipartimento de Geoingegneria e Tecnologie Ambientali di la Università degli Studi di Cagliari”, instituição que possui um equipamento denominado Rugosímetro ou Perthometro S3P segundo o fabricante (Fig. 19 e 20). Este é um equipamento mecânico de laboratório, projetado e construído para efetuar medições quantitativas das superfícies cortadas, e deste modo avaliar quantitativamente a qualidade resultante. Devido ao alto grau de precisão deste equipamento, ele é utilizado para avaliar as superfícies de rochas cortadas com jatos de água abrasivos. As principais características deste equipamento são relacionadas logo abaixo:



Fig. 26 Perthometro S3P



Fig. 27 Detalhe do estilete medindo GPP

### CARACTERÍSTICAS DO PERTHOMETRO S3P.<sup>57</sup>

Princípio de medição: Método de estilete, limite 2,5 mm profundidade.

Tabela 19 Limites de medição do Perthometro S3P

Gammas de medição				± 25	± 250	± 2500	µm
				± 1	± 10	± 100	µpolegada
Cut-off $\lambda_c$	0,025	0,08	0,25	0,80	2,50	8,00	mm
	0,001	0,003	0,010	0,032	0,100	0,320	polegada
Comprimento de avaliação	0,40	1,25	4,00	12,50	40,00		mm
	0,016	0,050	0,160	0,500	1,600		polegada
Comprimento transversal $l_t$	0,56	1,75	5,60	17,50	56,00		mm
	0,022	0,070	0,224	0,700	2,240		polegada

Parâmetros que mede o Perthometro <sup>27, 41, 57, 58, 59.</sup>

$M_r$  – Proporção material (Fig. 28), é a proporção expressada em % do comprimento do material compreendido pelos picos das estrias, referido ao comprimento  $l_m$  avaliado na seção do nível C do perfil:

$$M_r = 1/l_m(L_1+L_2+L_3+\dots+L_n)100\%$$

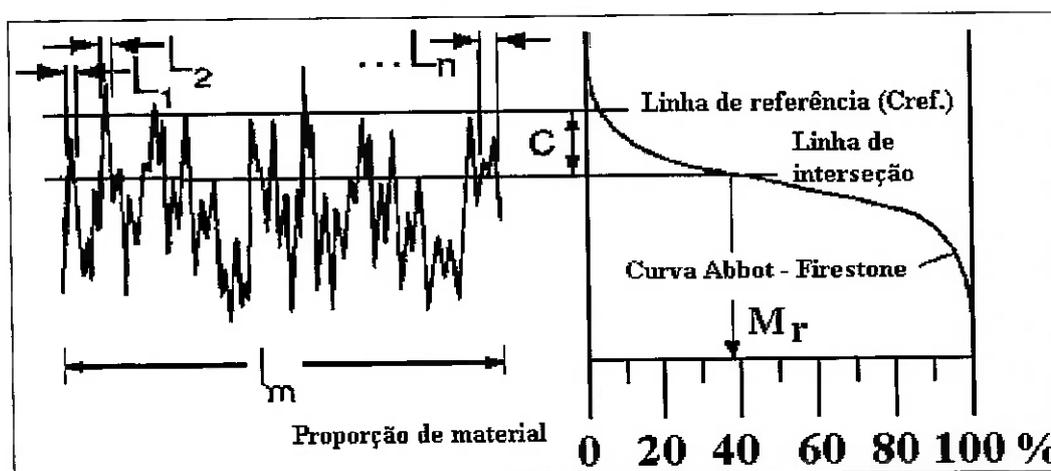


Fig. 28 Curva Abbot - Firestone e expressão da Proporção material

A seção do nível C do perfil é a distância entre a linha de interseção avaliada e a linha de referência selecionada  $C_{ref}$ . A Curva de proporção material (Curva Abbot - Firestone): mostra a proporção material  $M_r$  como uma função da Seção C do perfil.

Profundidade de nivelção  $R_p$  é a distância entre pico mais alto do perfil e a linha de referência ou linha de nivelção. É o indicador de rugosidade. Relaciona-se com  $R_m$  e  $R_y$ . (Fig. 29).

$R_m$  é a distância entre o vale mais profundo do perfil e a linha de referência, também denominada profundidade do vale do perfil.

$R_y$  é a distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo.

$$R_y = R_p + R_m$$

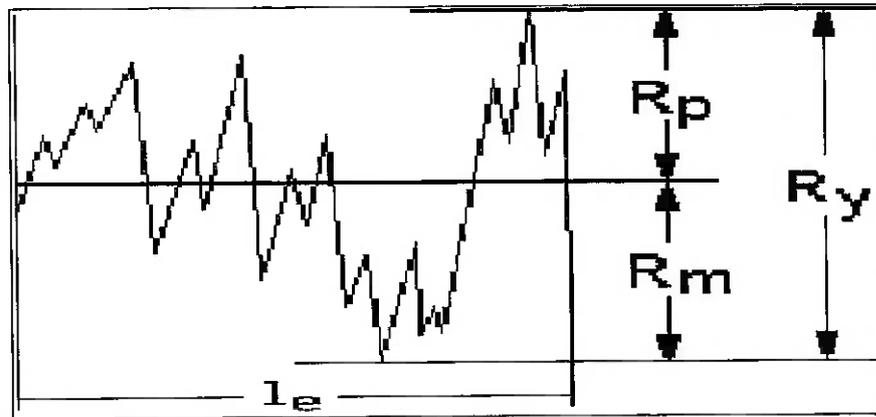


Fig. 29  $R_y$ ,  $R_p$ ,  $R_m$ .

$R_k$ ,  $R_{pk}$ ,  $Mr_1$ ,  $Mr_2$  (Fig. 30)

O perfil rugoso é gerado por uma técnica especial de filtrado que minimiza as distorções residuais do perfil. Uma linha reta divide a Curva Abbot - Firestone em 3 regiões ou áreas:

$R_k$  – Profundidade da rugosidade na área central do perfil.

$R_{pk}$  – Altura reduzida dos picos que é a altura média dos picos que vão além da área central.

$R_{vk}$  – Profundidade reduzida do vale que é a profundidade média dos vales que ficam abaixo da área central da rugosidade.

$Mr_1$  e  $Mr_2$  indicam a maior e a menor proporção material do coração do perfil de rugosidade.

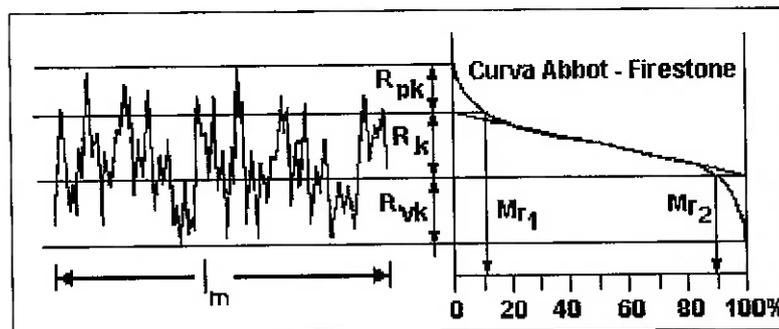
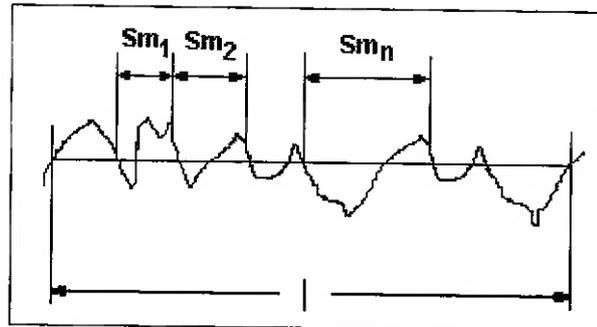


Fig. 30  $R_k$ ,  $R_{pk}$ ,  $Mr_1$ ,  $Mr_2$

$S_m$ ,  $\Delta q$ ,  $\lambda q$ .

$S_m$  é o valor da média aritmética das larguras dos elementos do perfil contidos no comprimento amostrado da superfície em avaliação. Elemento do perfil é um pico e o vale adjacente (Fig. 31), contido no comprimento amostrado.

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{m_i}$$

Fig. 31  $S_m$ 

Definições, parâmetros da textura superficial <sup>41, 57, 58, 59, 60, 61, 62.</sup>

Superfície real: aquela que separa o corpo do meio ao redor.

Instrumento “Stylus” ou Estilete: habilita ou possibilita a medição da superfície em duas dimensões XY da superfície. O estilete trabalha em posição normal à superfície a velocidade constante.

Perfil real: é o perfil envolvente da superfície real obtido mediante o uso do instrumento estilete. O perfil real inclui as formas de desvio (ou desvios): ondulações e rugosidades.

Avaliação: refere-se ao perfil real.

Cut-off (Limite  $\lambda_c$ ): do filtro do perfil, determina quais comprimentos de onda pertencem à rugosidade e quais à ondulação.

Comprimento de amostra ou amostrado  $l_e$ : é a parte do comprimento transversal  $l_t$  dentro do limite  $\lambda_c$ . O comprimento amostrado é o comprimento de referência para avaliar a rugosidade.

Comprimento de avaliação  $l_m$ : é a parte do comprimento transversal  $l_t$  que é avaliada. O comprimento de avaliação incluindo cinco comprimentos de amostragem consecutivos é tomado como norma.

Pré-curso: é a primeira parte do comprimento transversal  $l_t$ .

Pós-curso: é a última parte do comprimento transversal  $l_t$ .

Comprimento transversal  $l_t$ : é o comprimento completo percorrido pelo instrumento estilete do sistema durante a determinação do perfil real. É a soma do pré-curso, o comprimento de avaliação, e o pós-curso.

### Parâmetros de Rugosidade. Definições e determinação.

Estes parâmetros são definidos com respeito ao comprimento amostrado  $l_e$  ( $\cong$  comprimento de referência  $l$ ,  $\cong$  cut-off  $\lambda_c$ ), se não é especificado de outra forma. Os resultados são indicados como valores médios de vários comprimentos amostrados. A norma é de cinco comprimentos amostrados sucessivos, de outro modo a quantidade de comprimentos deverá ser estabelecida antes.

Linha de referência (vide Fig. 28): a linha de referência para avaliação da rugosidade é a linha média do comprimento de onda do perfil real, gerada por um filtro. A linha de referência para avaliação da rugosidade é a linha reta média dentro do comprimento amostrado.

Filtro do perfil: Filtros do perfil dividem o perfil real nos componentes do comprimento de onda que pertencem ao perfil ondulado e os componentes de onda curta formam o perfil de rugosidade.

Linha média: é gerada por um filtro corretor de fase calculando o peso médio por cada ponto do perfil real.

Função pesada: indica para cada ponto do perfil o fator de avaliação com o qual os pontos vizinhos do perfil entram no cálculo do peso médio para cada ponto do perfil real (Curva de Gauss)

R-perfil (perfil de rugosidade): São os desvios do perfil real da linha média. Quando é apresentado o perfil de rugosidade, a linha média é a linha zero.

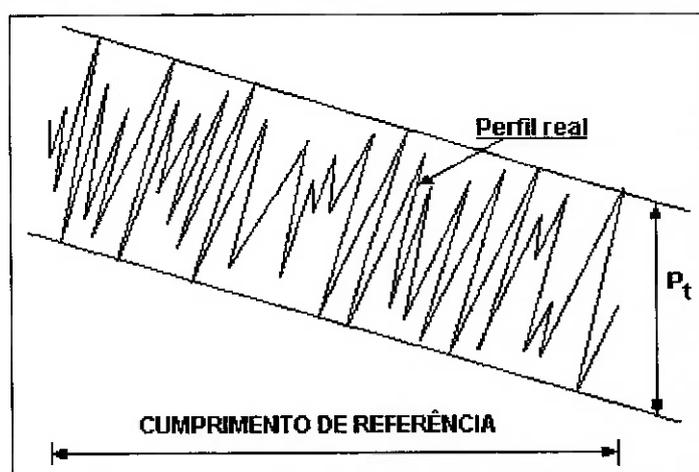


Fig. 32 Profundidade do perfil

Profundidade do perfil ( $P_t$ ) (Fig. 32): distância entre duas linhas equidistantes limitantes, que tem a forma do perfil geométrico ideal e acompanham e limitam o perfil real dentro do comprimento de referência à distância mínima.

Linha de regressão linear: a linha que intersecta ou corta o perfil real de maneira que as somas dos quadrados de todos os desvios do perfil dentro do comprimento de avaliação são mínimas.

$R_z$ ,  $R_{max}$  Roughness depth (Figura 33)

Profundidade da rugosidade simples  $Z_i$ : é a distância vertical do ponto mais alto até o ponto mais profundo do perfil ( $=R_y$ )

Profundidade média da rugosidade  $R_z$ : é o valor médio da profundidade da rugosidade simples  $Z_i$  de comprimentos amostrados sucessivos:

$$R_z = R_{Z_{DIN}} = 1/n(Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n)$$

$R_{Z_{DIN}}$  é igual ao valor médio de muitos comprimentos amostrados.

Profundidade máxima de rugosidade  $R_{max}$ : é a maior rugosidade simples dentro do comprimento avaliado.

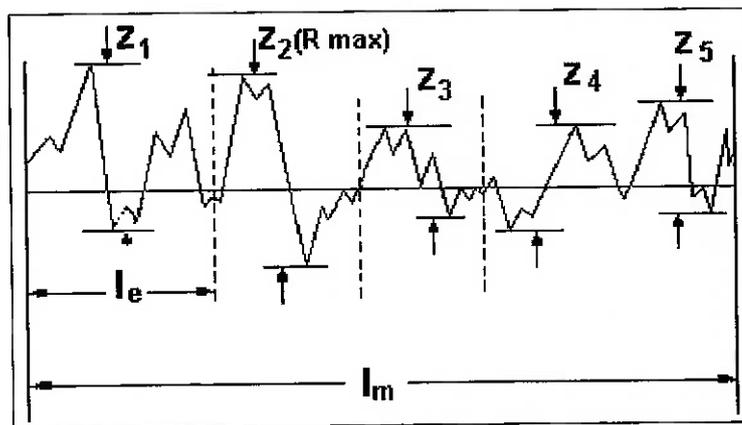


Fig. 33 Profundidade da rugosidade

Profundidade da ondulação,  $W_t$  (Fig. 34): a distância vertical entre duas linhas limites equidistantes que tenham a forma do perfil ideal geométrico e acompanhando o perfil da ondulação dentro do comprimento de avaliação a distância mínima.

W-perfil (perfil de ondulação): a linha média gerada pelo filtro do perfil sem os componentes do perfil de comprimento de onda que pertencem à forma.

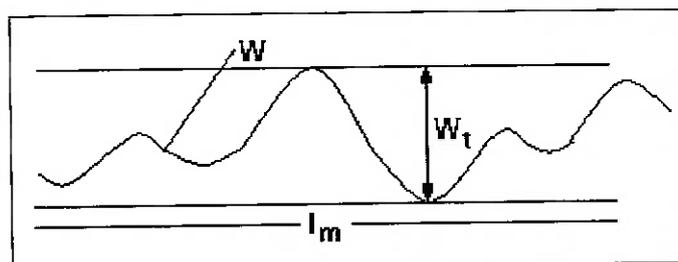


Fig. 34 W-perfil (perfil de ondulação)

**Ra, Rq** Rugosidade média (Fig. 35).

Desvio médio aritmético Ra: a média aritmética das áreas em todo o perfil de todos os valores do perfil de rugosidade.

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx$$

Raiz quadrada da média do desvio Rq: é o cálculo da raiz quadrada média em todo o perfil de todos os valores do perfil de rugosidade.

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l |y(x)|^2 dx}$$

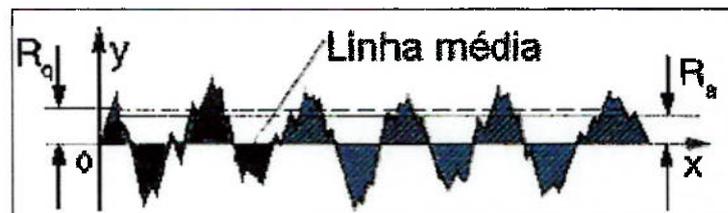


Fig. 35 Ra, Rq Rugosidade média

No presente trabalho foram avaliadas: Ra, Rz, Rmax, Rk, Rp, Pt, e Wt.

O Rugosímetro, avalia perfis perpendiculares à direção dos sulcos e paralelos a direção de translação do bocal, registrando graficamente e com elevado nível de precisão, as imperfeições ou estrias do corte. Esta avaliação foi aplicada aos cortes efetuados durante os ensaios 1, 2, 3, 4, e 5. Para isso, nos corpos de prova, efetuou-se corte perpendicular às áreas cortadas pelo jato abrasivo com ajuda da serra diamantada do LMR – PMI – EPUSP, destacando assim corpos de prova menores, de forma triangular (Fig. 29), com as paredes dos sulcos cortados nas combinações de V(mm/s)/Np: 2/2, 4/4, 8/8, 16/16, 32/32 e 64/64. Nestes corpos de prova de forma triangular, foi efetuada a avaliação de rugosimetria utilizando o Perthometro S3P.

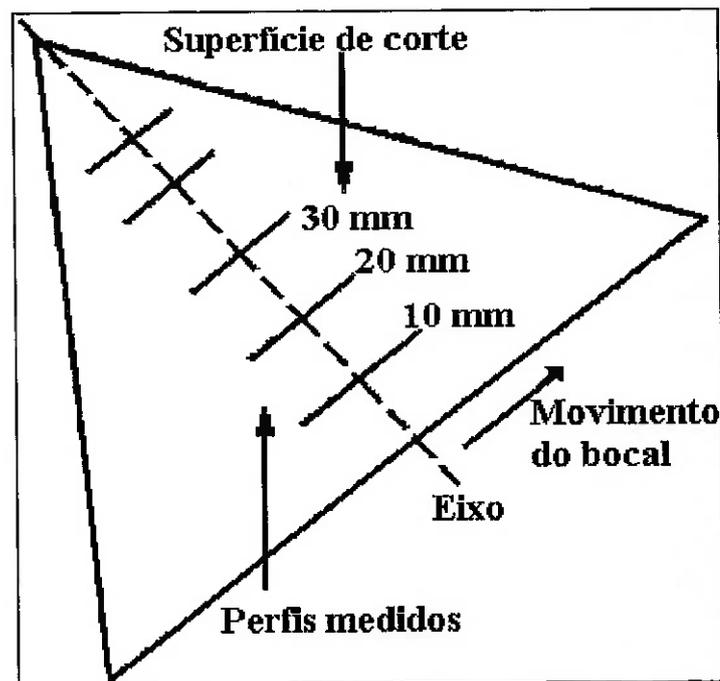


Fig. 36 Esquema dos corpos de prova triangular e da disposição dos perfis avaliados no Perthometro S3P.

### 3.8.4 Estudo do comportamento dos grãos minerais diante do jato abrasivo.

Na pesquisa já citada <sup>2</sup> foram efetuados estudos com microscópio eletrônico de varredura da superfície das amostras para avaliar, qualitativamente, os níveis de rugosidade resultante dos cortes das diferentes qualidades em cada corpo de prova. Porém, as fotos deste trabalho, todas em tons de cinza, mostradas na dissertação, não permitem distinguir com clareza, os diferentes minerais presentes e como responderam à ação de corte com jato de água de ultra-alta pressão com abrasivo.

Para efetuar essa análise o autor do presente trabalho decidiu digitalizar em "scanner" as superfícies cortadas e destacadas dos corpos de prova. A digitalização foi efetuada com alto grau de detalhamento e ainda depois as fotos assim obtidas foram submetidas a aumentos de 200 %. Utilizando este recurso e combinando com estudo das próprias amostras em Lupa Binocular do LCT – PMI, observou-se o efeito do jato abrasivo sobre os grãos minerais durante a operação de corte ao atravessar o corpo de prova, sobretudo no caso dos granitos, por possuírem diferentes minerais, com propriedades anisotrópicas variáveis. Algumas destas fotos e a descrição do observado, são apresentadas no capítulo Resultados.

#### **3.8.4 Análise dos custos das operações de corte de rochas com o jato d'água abrasivo.**

Finalmente, é efetuada análise dos custos das operações de corte de rochas aplicando a técnica de jato d'água abrasivo de ultra-alta pressão. A mesma se baseou em análises similares de trabalhos internacionais consultados <sup>25</sup> e em trabalhos apresentados pelo GPJAE sobre corte de materiais friáveis <sup>35, 37</sup>. Deve-se destacar que embora a importação de equipamento por parte de Instituição universitária não é taxada pelas contribuições alfandegárias, as mesmas foram incluídas no cálculo por entender-se que os resultados seriam mais abrangentes no que se refere à indústria brasileira, além de oferecer base para o cálculo do custo horário da propriedade. Devido ao caráter flutuante do câmbio da moeda brasileira, como taxa cambial foi considerado o valor de R\$ 2,95 por USD\$ 1,00 pois durante o ano 2002 o valor ascendeu até quase quatro reais por um dólar dos Estados Unidos, mas em 2003 o mesmo desceu e hoje se encontra aproximadamente nesse patamar considerado.

**4.— RESULTADOS E INTERPRETAÇÃO**

**4.1 Afunilamento do corte**

De acordo com o estabelecido no capítulo anterior, o afunilamento do corte foi avaliado nos corpos de prova N° 1 das rochas ensaiadas. As avaliações são apresentadas na ordem dos ensaios: GPP, GVCB, GPI e MBCJ.

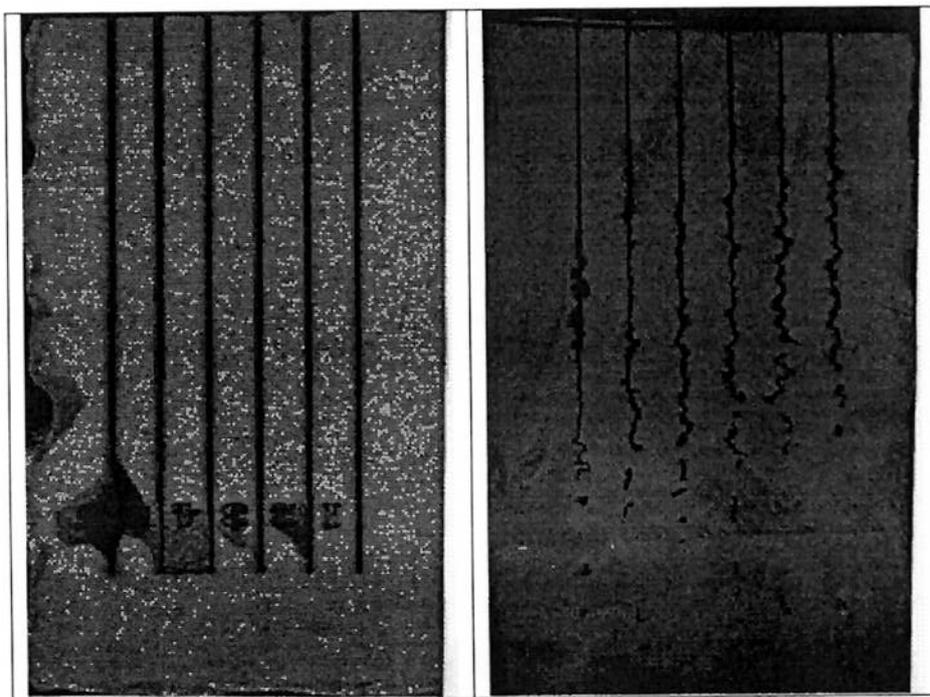


Fig.37. Sulcos de entrada e saída do jato abrasivo no Corpo de prova No 1 GPP.

Tabela 20 Largura dos sulcos na entrada e na saída do jato em GPP.

Direção do jato	Local de medição (mm)	Sulcos					
		1	2	3	4	5	6
Entrada (L <sub>T</sub> )	(1) 0 - 49	1,6	1,5	1,7	1,5	1,5	1,9
	(2) 69 - 127	1,7	1,5	1,6	1,3	1,4	1,7
	(3) 147 - 196	1,5	1,5	1,5	1,5	1,3	1,8
	(4) Média	1,6	1,5	1,6	1,43	1,40	1,8
Saída (L <sub>B</sub> )	(5) Liso	0,95	1,0	1,0	1,1	1,0	1,2
	(6) Estriado	1,3	1,3	1,5	1,4	1,2	1,3
	(7) Ondulado	4,5	2,0	1,9	2,3	2,0	1,9
	(8) Média	2,25	1,43	1,47	1,60	1,40	1,47
Velocidade mm/s		2	4	8	16	32	64
No. de Passos		2	2	4	8	16	32

A vista desarmada: os cortes dos sulcos da Fig. 37 apresentam larguras similares de entrada e saída (Tabela 20). O pequeno tamanho dos grãos minerais dificulta a identificação a olho nu do mineral cortado no local da medição. A textura porfirítica da rocha facilita o corte com o jato abrasivo. A aparência do corte é parecida com a do corte de metais.

Tabela 21 Relação entrada / saída para determinar o grau de afunilamento em GPP.

Relação( $T_R$ )	2/2	4/4	8/8	16/16	32/32	64/64
1. - (1)/(5)	1,684211	1,5	1,7	1,363636	1,5	1,583333
2. - (2)/(6)	1,307692	1,153846	1,066667	0,928571	1,166667	1,307692
3. - (3)/(7)	0,333333	0,75	0,789474	0,652174	0,65	0,947368
4. - (4)/(8)	0,355556	1,048951	1,088435	0,89375	1	1,22449

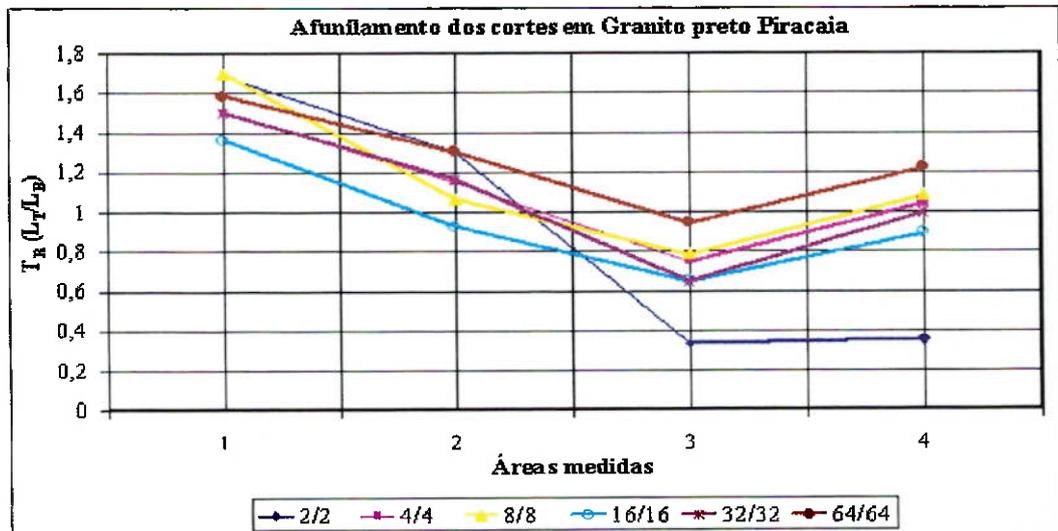


Fig. 38 Grau de afunilamento nas linhas de corte em GPP

Da Fig. 38, se pode interpretar, segundo a fórmula sobre afunilamento referida no capítulo anterior, que:

- (1)/(5)  $T_R > 1$  para todas as combinações de  $V/N_p$ . Afunilamento convergente.
- (2)/(6)  $T_R > 1$  para  $V/N_p$ : 2/2, 4/4, 8/8, 32/32 e 64/64: Afunilamento convergente; porém para 16/16  $T_R < 1$  Afunilamento divergente.
- (3)/(7)  $T_R < 1$  para todas as combinações de  $V/N_p$ . Afunilamento divergente.
- (4)/(8) para 64/64, 8/8 e 4/4  $T_R > 1$  Afunilamento convergente, para (32/32)  $T_R = 1$  aparentemente sem afunilamento, para (16/16)  $T_R < 1$  Afunilamento divergente, para (2/2)  $T_R \ll 1$  Afunilamento muito divergente.

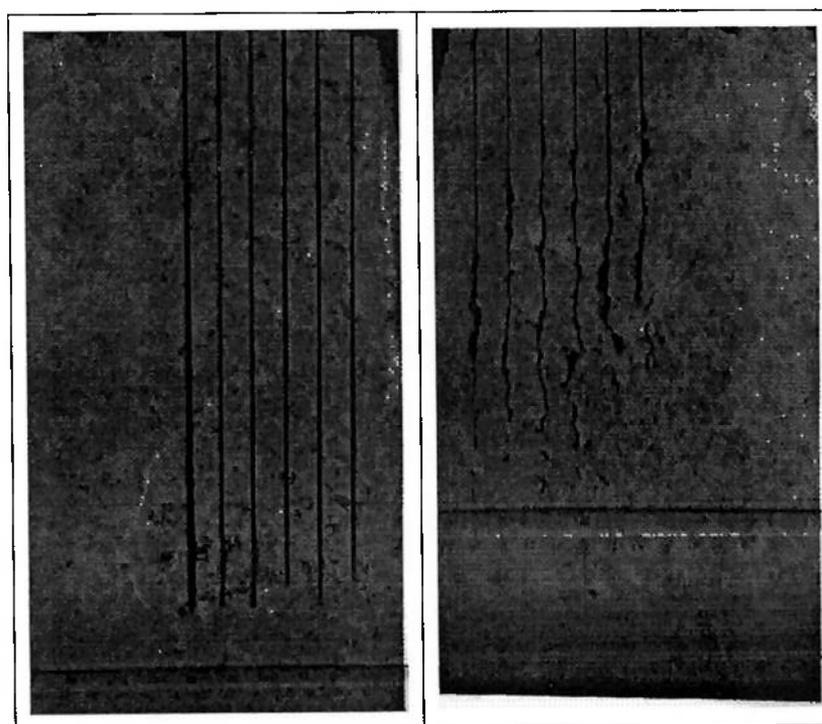


Fig. 39. Sulcos de entrada e saída do jato abrasivo no Corpo de prova No 1 GVCB

Tabela 22 Largura dos sulcos na entrada e na saída do jato em GVCB.

Direção do jato	Local de medição mm	Sulcos					
		1	2	3	4	5	6
Entrada (L <sub>T</sub> )	(1) 0 - 48	2,0	1,6	1,6	1,5	1,8	2,0
	(2) 72 - 120	1,9	1,9	1,7	1,6	1,9	2,9
	(3) 145 - 193	1,9	1,9	1,8	1,5	1,9	3,0
	(4) Média	1,93	1,8	1,7	1,53	1,87	2,63
Saída (L <sub>B</sub> )	(5) Liso	1,0	1,0	1,0	1,0	1,3	1,0
	(6) Estriado	1,5	1,6	2,0	1,5	1,1	1,5
	(7) Ondulado	4,0	3,0	2,0	3,0	4,1	2,5
	(8) Média	2,17	1,87	1,67	1,83	2,17	1,67
Velocidade mm/s		2	4	8	16	32	64
No. de Passos		2	4	8	16	32	64

À vista desarmada, se pode dizer que no início e na parte média dos cortes da Fig. 3, avaliados na Tabela 3, o quartzo facilitou o corte estreito enquanto que o feldspato alarga o sulco. No final do corte a influência do quartzo se mantém, porém menos clara. Na Tabela 23 se apresenta a relação entrada/saída para interpretar o afinilamento.

Tabela 23 Relação entrada/saída para determinação do afunilamento ( $T_R$ ) em GVCB.

Relação ( $T_R$ )	2/2	4/4	8/8	16/16	32/32	64/64
1. - (1)/(5)	2	1,6	1,6	1,5	1,384615	2
2. - (2)/(6)	1,266667	1,1875	0,85	1,066667	1,727273	1,933333
3. - (3)/(7)	0,475	0,633333	0,9	0,5	0,463415	1,2
4. - (4)/(8)	0,889401	0,962567	1,017964	0,836066	0,861751	1,57485

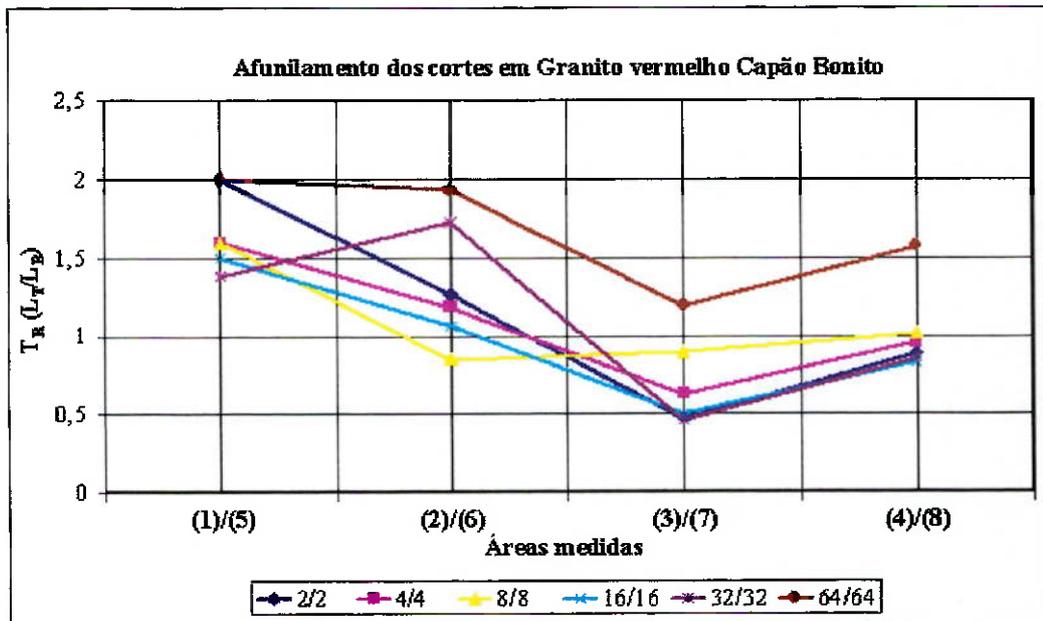


Fig. 40 Grau de afunilamento nas linhas de corte em GVCB

Da Fig. 40, se pode interpretar, segundo a fórmula sobre afunilamento referida no capítulo anterior, que:

- (1)/(5)  $T_R > 1$  para todas as combinações de V/Np: Afunilamento convergente.
- (2)/(6)  $T_R > 1$  para as combinações V/Np 2/2, 4/4, 16/16, 32/32 e 64/64 Afunilamento convergente; porém para 8/8  $T_R < 1$  Afunilamento divergente.
- (3)/(7)  $T_R < 1$  para quase todas as combinações de V/Np Afunilamento divergente, porém é convergente para 64/64  $> 1$ .
- (4)/(8) para as combinações de V/Np 2/2, 4/4, 16/16 e 32/32  $T_R < 1$ : Afunilamento divergente; para 8/8  $T_R = 1$  aparentemente sem afunilamento; e finalmente para a combinação 64/64  $T_R > 1$  Afunilamento convergente.

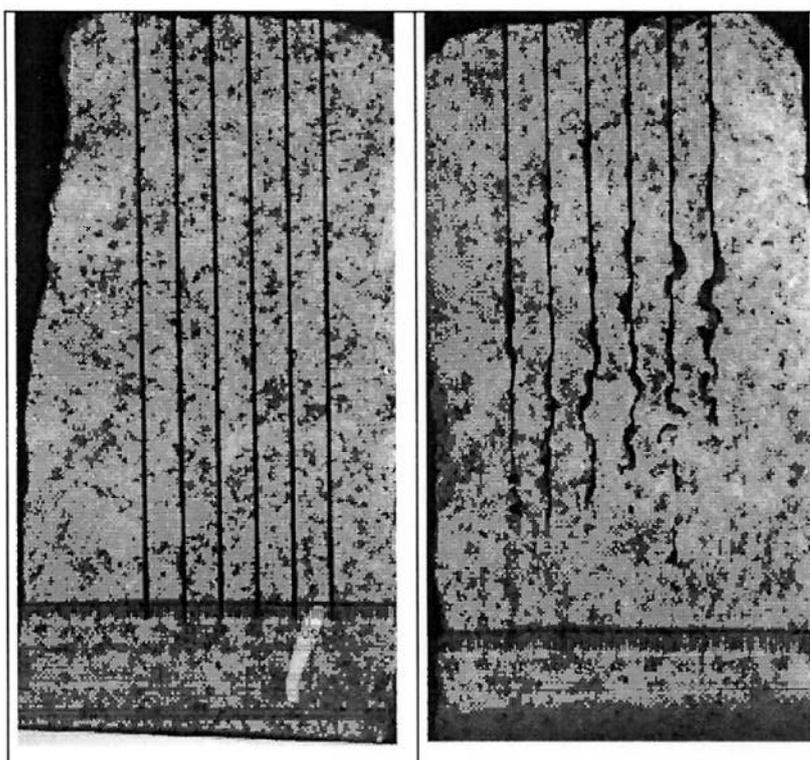


Fig. 41. Sulcos de entrada e saída do jato abrasivo no Corpo de prova No 1 GPI

Tabela 24 Largura dos sulcos na entrada e na saída do jato em GPI.

Direção do jato	Local de medição mm	Sulcos					
		1	2	3	4	5	6
Entrada (L <sub>T</sub> )	(1) 0 - 50	1,5	1,5	1,6	1,3	1,8	1,7
	(2) 75 - 125	1,6	1,3	1,5	1,2	1,3	1,4
	(3) 150 - 200	1,7	1,9	1,6	1,6	1,6	1,7
	(4) Média	1,6	1,57	1,57	1,37	1,57	1,6
Saída (L <sub>B</sub> )	(5) Liso	0,9	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1
	(6) Estriado	1,2	2,0	2,3	2,2	1,2	1,2
	(7) Ondulado	3,7	2,6	3,4	4,0	4,0	4,0
	(8) Média	1,93	1,87	2,27	2,43	2,10	2,10
Velocidade mm/s		2	4	8	16	32	64
No. de Passos		2	4	8	16	32	64

Do ponto de vista macroscópico, pode-se dizer que, em geral, a largura dos sulcos é estável nos cortes apresentados na Fig. 41. Da Tabela 24 se percebe que na entrada a diferença máxima é de 0,23 mm e na saída é de 0,56 mm. A olho nu, o quartzo parece facilitar o corte. Na Tabela 25 se apresenta a relação entrada/saída.

Tabela 25 Relação entrada/saída para determinação do afunilamento ( $T_R$ ) em GPI.

Relação ( $T_R$ )	2/2	4/4	8/8	16/16	32/32	64/64
1. - (1)/(5)	1,666667	1,5	1,454545	1,181818	1,636364	1,545455
2. - (2)/(6)	1,333333	0,65	0,652174	0,545455	1,083333	1,166667
3. - (3)/(7)	0,459459	0,730769	0,470588	0,4	0,4	0,425
4. - (4)/(8)	0,829016	0,839572	0,69163	0,563786	0,747619	0,761905

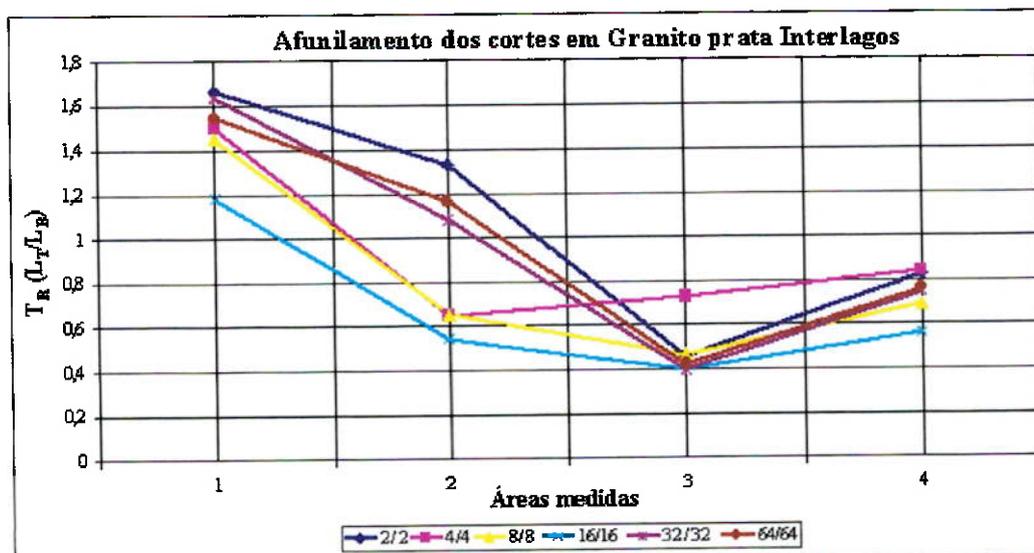


Fig. 42 Grau de afunilamento nas linhas de corte em GPI.

Da Fig. 42, se pode interpretar, segundo a fórmula sobre afunilamento referida no capítulo de Material e Métodos, que:

- (1)/(5)  $T_R > 1$  para todas as combinações de V/Np: Afunilamento convergente.
- (2)/(6)  $T_R > 1$  para as combinações V/Np 2/2, 32/32, 64/64: Afunilamento convergente; porém é  $T_R < 1$  para 4/4, 8/8 e 16/16: Afunilamento divergente.
- (3)/(7)  $T_R < 1$  para todas as combinações de V/Np Afunilamento divergente.
- (4)/(8)  $T_R < 1$  para todas as combinações de V/Np Afunilamento divergente.

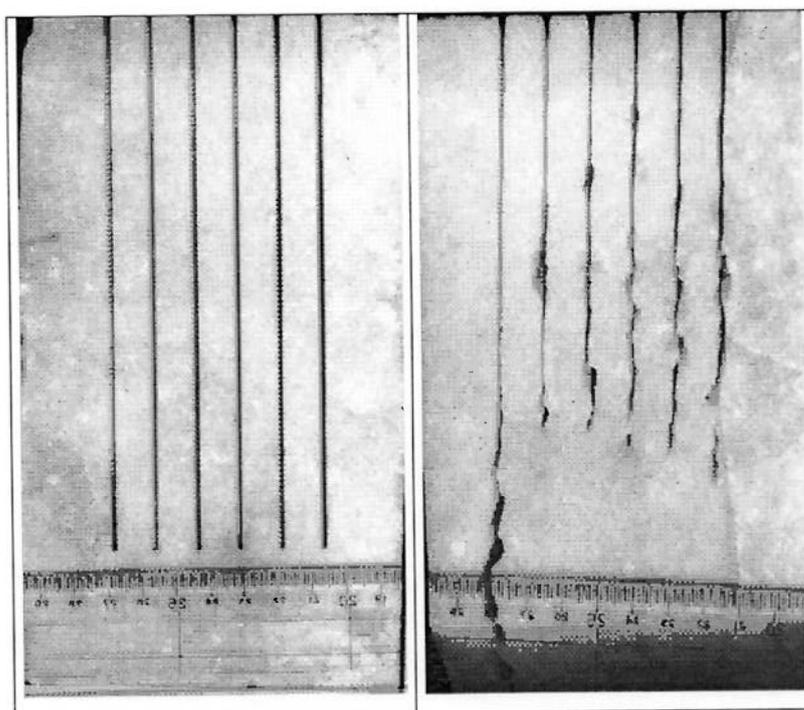


Fig. 43. Sulcos de entrada e saída do jato abrasivo no Corpo de prova No 1 MBCJ.

Tabela 26 Largura dos sulcos na entrada é na saída do jato em MBCJ.

Direção do jato	Local de medida mm	Sulcos					
		1	2	3	4	5	6
Entrada (L <sub>T</sub> )	(1) 0 - 20	1,9	1,7	1,9	1,5	1,7	1,7
	(2) 67 - 87	1,9	1,7	1,9	1,5	1,6	1,5
	(3) 134 - 154	1,9	1,2	1,9	1,3	1,5	1,1
	(4) Média	1,9	1,53	1,9	1,43	1,6	1,43
Saída (L <sub>B</sub> )	(5) Liso	1,5	1,1	1,9	1,4	1,3	1,6
	(6) Estriado	1,1	1,5	1,6	2,2	2,2	2,3
	(7) Ondulado	3,5	4,0	3,5	2,5	2,5	2,6
	(8) Média	2,03	2,2	2,33	2,03	2,00	2,17
Velocidade mm/s		1	4	8	16	32	64
No. de Passos		1	2	4	8	16	32

Na observação macroscópica se vê que a homogeneidade da largura dos sulcos é evidente nos cortes apresentados na Fig. 43. O caráter mono-mineral da rocha parece favorecer isto. A olho nu, a rugosidade observada nas paredes dos cortes destacados, parece aumentar na presença de grãos minerais mais duros, tal vez de dolomita, arrancados ou estourados pelo jato quando este alarga seu diâmetro.

Tabela 27 Relação entrada/saída para determinação do afunilamento ( $T_R$ ) em GPI.

Relação ( $T_R$ )	2/2	4/4	8/8	16/16	32/32	64/64
1. - (1)/(5)	1,266667	1,545455	1,0	1,071429	1,307692	1,0625
2. - (2)/(6)	1,727273	1,133333	1,1875	0,681818	0,727273	0,652174
3. - (3)/(7)	0,542857	0,3	0,542857	0,52	0,6	0,423077
4. - (4)/(8)	0,935961	0,695455	0,815451	0,704433	0,8	0,658986

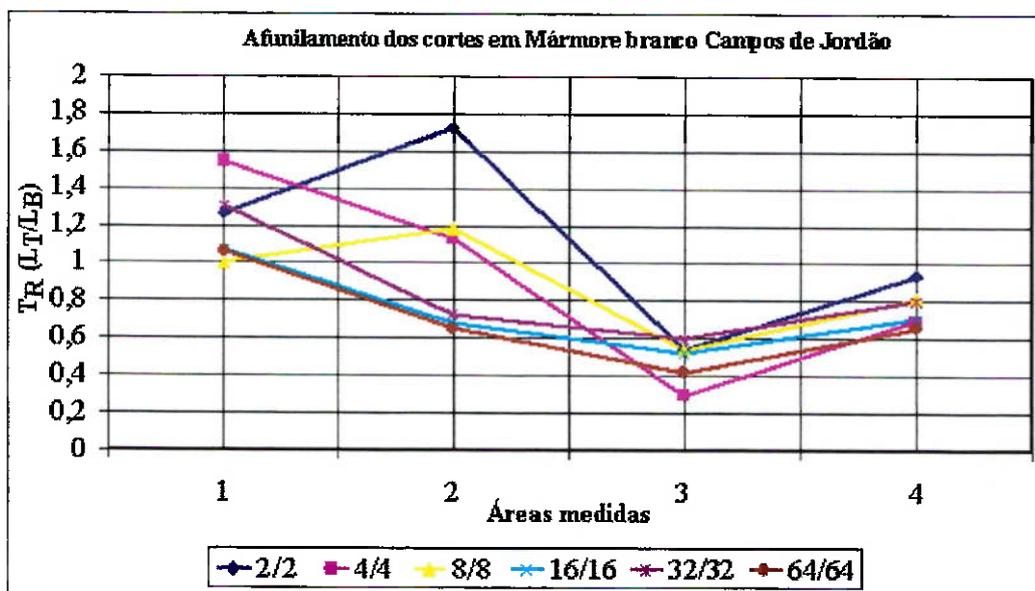


Fig. 44 Grau de afunilamento nas linhas de corte em MBCJ

Da Fig. 44, se pode interpretar, segundo a fórmula sobre afunilamento referida no capítulo anterior:

- (1)/(5)  $T_R > 1$  para quase todas as combinações de  $V/N_p$ : Afunilamento convergente. Com exceção da combinação 8/8 em que  $T_R = 1$  aparentemente sem afunilamento.
- (2)/(6)  $T_R > 1$  para as combinações  $V/N_p$  2/2, 4/4, 8/8: Afunilamento convergente; porém  $T_R < 1$  para 16/16, 32/32, e 64/64: Afunilamento divergente.
- (3)/(7)  $T_R < 1$  para todas as combinações de  $V/N_p$  Afunilamento divergente.
- (4)/(8)  $T_R < 1$  para todas as combinações de  $V/N_p$  Afunilamento divergente.

#### 4.2. Altura do corte liso (h liso), e altura do corte total (h).

Resultados dos ensaios de corte em granitos são mostrados na tabela 9 e nas Fig. 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, e 20.

Tabela 28 Alturas do corte liso e do corte total dos granitos.

Ensaio Nº	Dados				GPP *		GVCB		GPI	
	V (mm/s)	Np	TTC (s)	Abrasivo (kg)	h liso (mm)	h total (mm)	h liso (mm)	h total (mm)	h liso (mm)	h total (mm)
1	1	1	200	1,06	29,94	61,46	24,93	49,86	41,69	84,84
2	1	2	400	2,12	33,88	76,44	31,37	73,15	44,25	98,01
3	1	4	800	4,24	38,61	99,29	32,80	96,44	46,81	111,17
4	1	8	1600	8,48	40,19	122,14	29,52	106,22	51,96	121,59
5	1	16	3200	16,96	48,86	130,00	26,24	116,00	57,10	132,00
6	2	1	100	0,53	26,00	38,61	20,02	41,99	29,62	63,63
7	2	2	200	1,06	33,45	71,75	33,10	70,41	34,93	98,10
8	2	4	400	2,12	33,10	92,99	37,87	74,57	36,41	105,38
9	2	8	800	4,24	37,30	108,24	42,64	78,73	41,69	120,67
10	2	16	1600	8,48	38,03	120,67	26,24	112,46	40,62	122,68
11	4	1	50	0,27	10,24	29,25	15,10	34,12	17,55	42,42
12	4	2	100	0,53	14,63	31,45	22,00	48,71	21,78	71,00
13	4	4	200	1,06	19,39	67,87	18,66	69,81	26,01	99,58
14	4	8	400	2,12	19,75	96,54	38,15	76,68	25,08	106,47
15	4	16	800	4,24	21,21	103,85	26,24	108,91	24,14	113,36
16	8	1	25	0,13	11,70	19,02	9,55	22,06	12,07	26,33
17	8	2	50	0,27	12,43	35,11	11,00	27,00	10,24	36,57
18	8	4	100	0,53	12,43	56,31	12,33	49,41	15,90	66,59
19	8	8	200	1,06	12,12	66,90	15,65	74,63	21,55	96,61
20	8	16	400	2,12	13,16	76,06	17,64	90,52	19,13	106,10
21	16	1	13	0,07	5,85	12,43	4,00	10,00	6,58	10,24
22	16	2	25	0,13	6,58	25,60	5,00	19,50	5,85	25,60
23	16	4	50	0,27	8,04	38,03	6,00	29,00	5,12	40,96
24	16	8	100	0,53	16,09	55,58	7,52	50,61	9,62	69,90
25	16	16	200	1,06	9,70	59,15	9,03	72,22	14,12	98,84

\* No CP-2, mais duas linhas foram cortadas para atravessar o corpo de prova:

Linha 1 Qualidade 5,  $V = 0,192$ ,  $Np = 1$ ,  $h$  liso = 70,92 mm, e  $h$  total = 130 mm

Linha 2 Qualidade e,  $V = 0,15$ ,  $Np = 1$ ,  $h$  liso = 88,26 mm, e  $h$  total = 130 mm

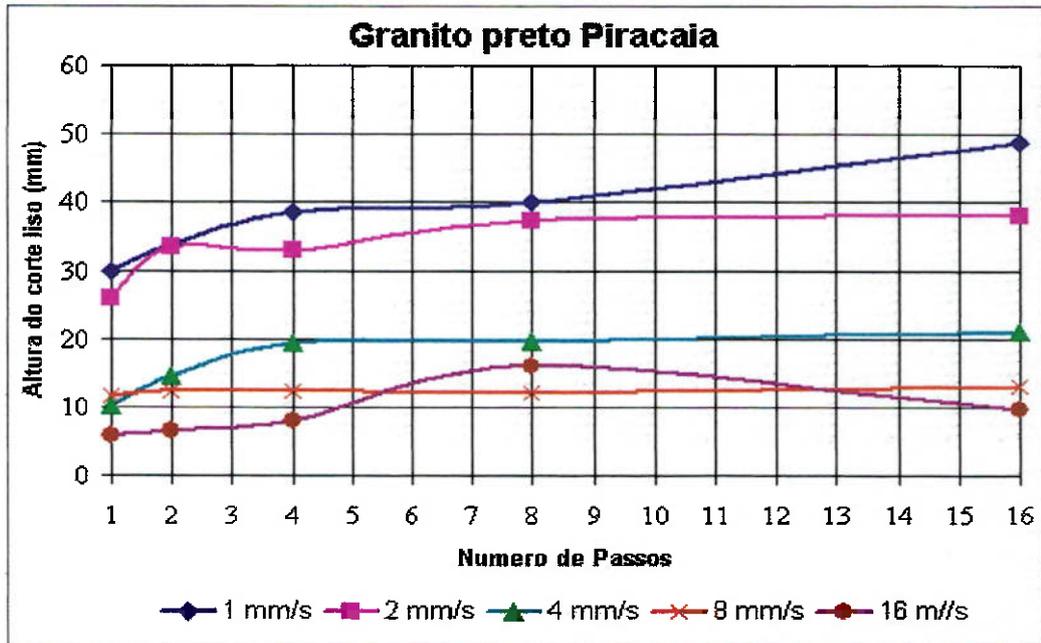


Fig. 45 Altura do corte liso segundo Np por V para GPP.

Na Fig. 45 se percebe que quando Np aumenta, o h liso aumenta também. A combinação com menor V e maior Np atingiu o maior h liso. De forma geral depois de Np = 8 o h liso se estabiliza, com exclusão da curva 16 mm/s em que diminui.

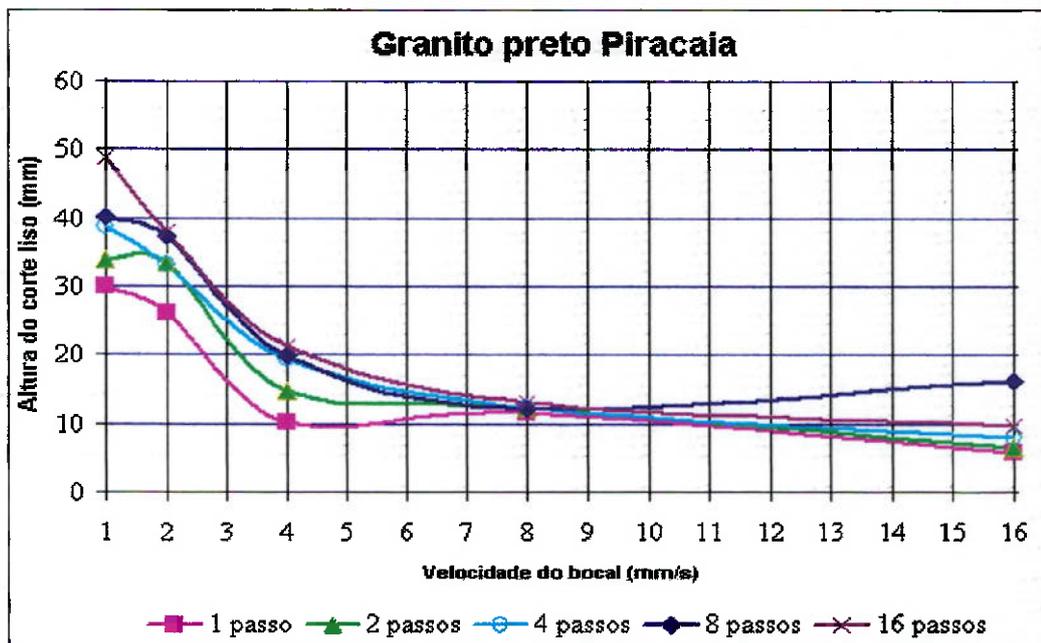


Fig. 46 Altura do corte liso segundo V por Np para GPP.

De forma geral quando V aumenta, diminui a altura do corte h liso. Na Fig. 46 as curvas se unem no mesmo h liso em V = 8 mm/s.

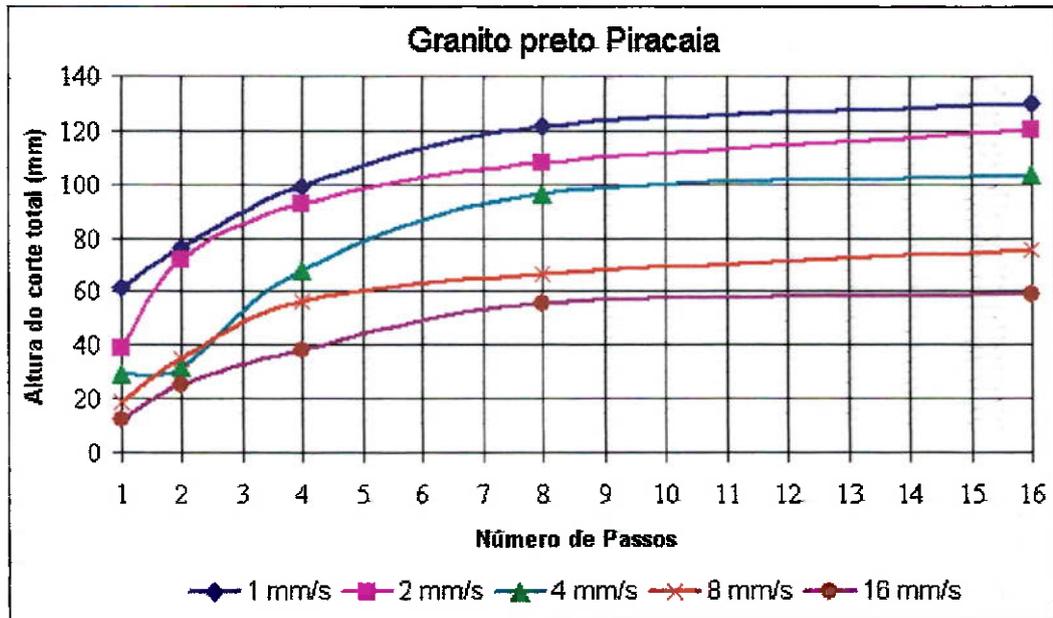


Fig. 47 Altura do corte total segundo Np por V para GPP.

Também na Fig. 47 se confere que quando aumenta Np, aumenta a h total. Similar a Figura 45, a combinação com menor V e maior Np atingiu a maior h total.

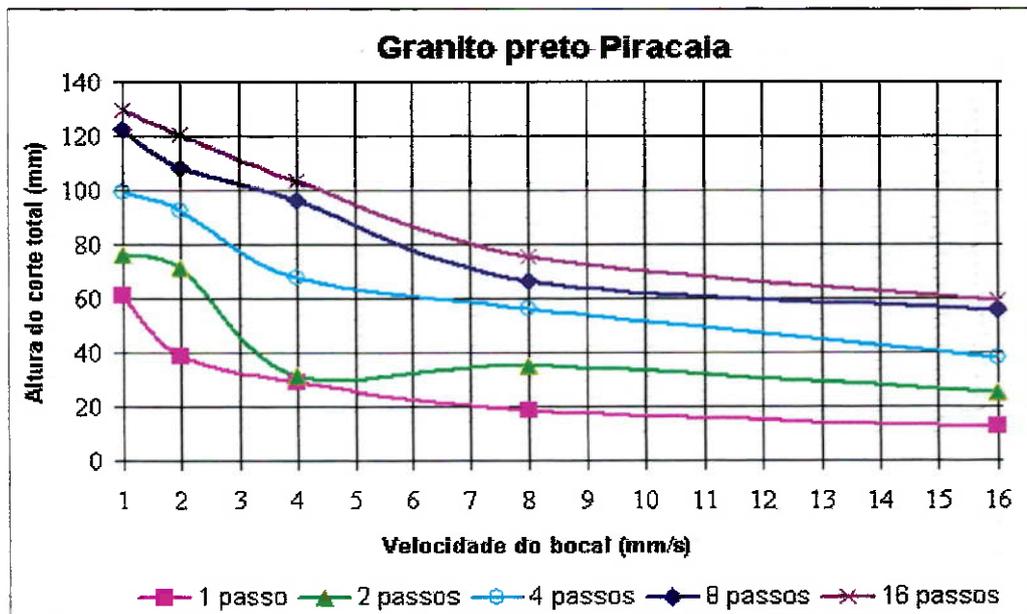


Fig. 48 Altura do corte total segundo V por Np para GPP.

Na Fig. 48 Acontece de forma similar à figura 46, onde o aumento de V, diminui a h liso. E também se confere maior h total para a combinação com menor V e maior Np.

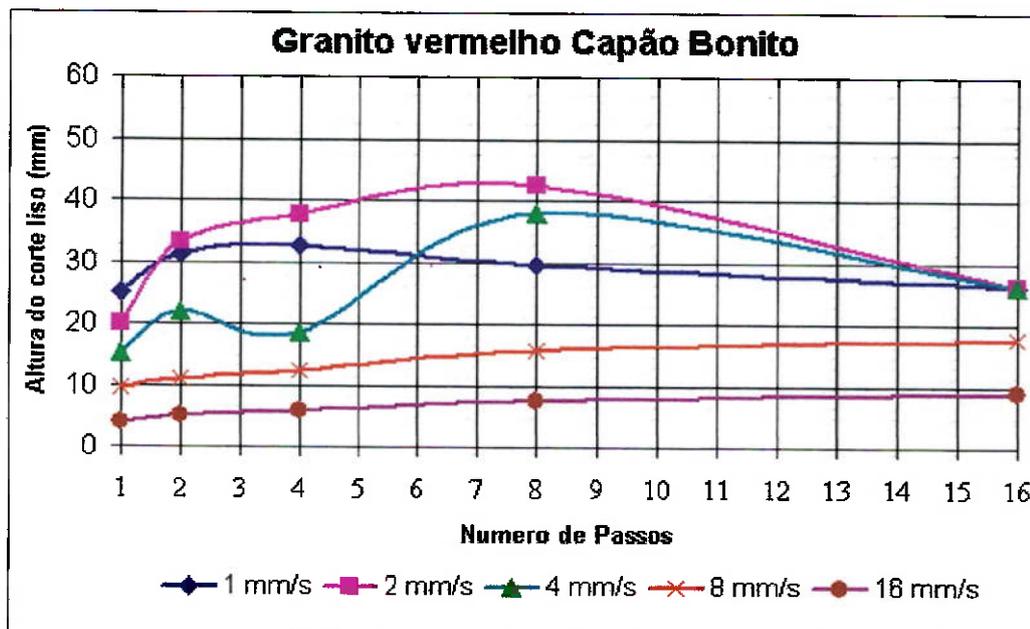


Fig. 49 Altura do corte liso segundo Np por V para GVCB.

No GVCB (Fig. 49) o aumento do Np influi no aumento do h liso somente em duas velocidades (8 e 16 mm/s). Nas velocidades restantes, após ultrapassar V = 8 mm/s, a tendência é a diminuir o h liso.

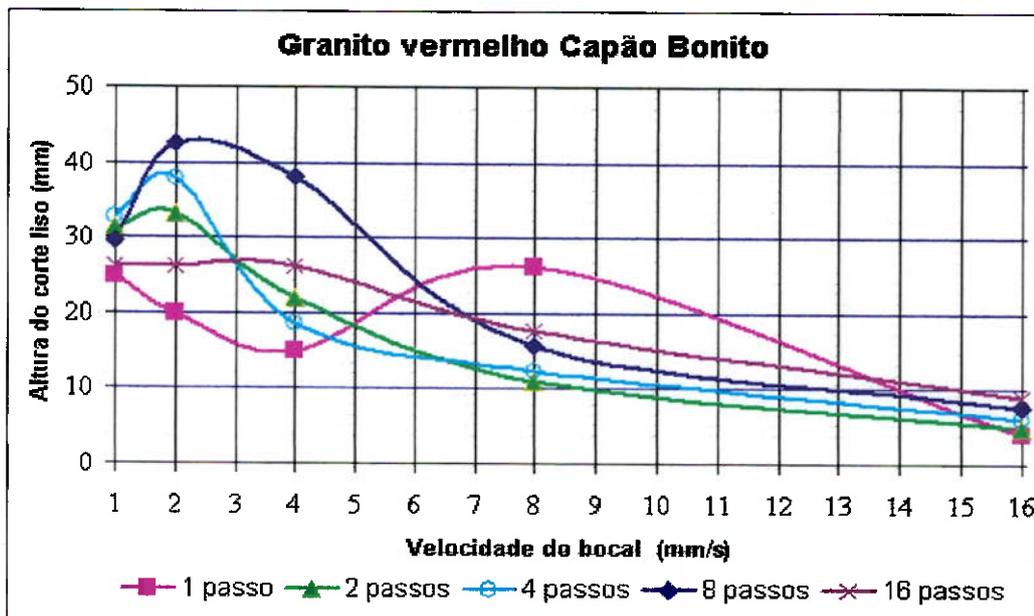


Fig. 50 Altura do corte liso segundo V por Np para GVCB.

Em GCVB (Fig. 50), a tendência geral das curvas é de que o h liso diminui com o aumento de V, embora nas primeiras velocidades apresente leves aumentos. A combinação V = 2 mm/s, e Np = 8 conseguem h liso > 40 mm.

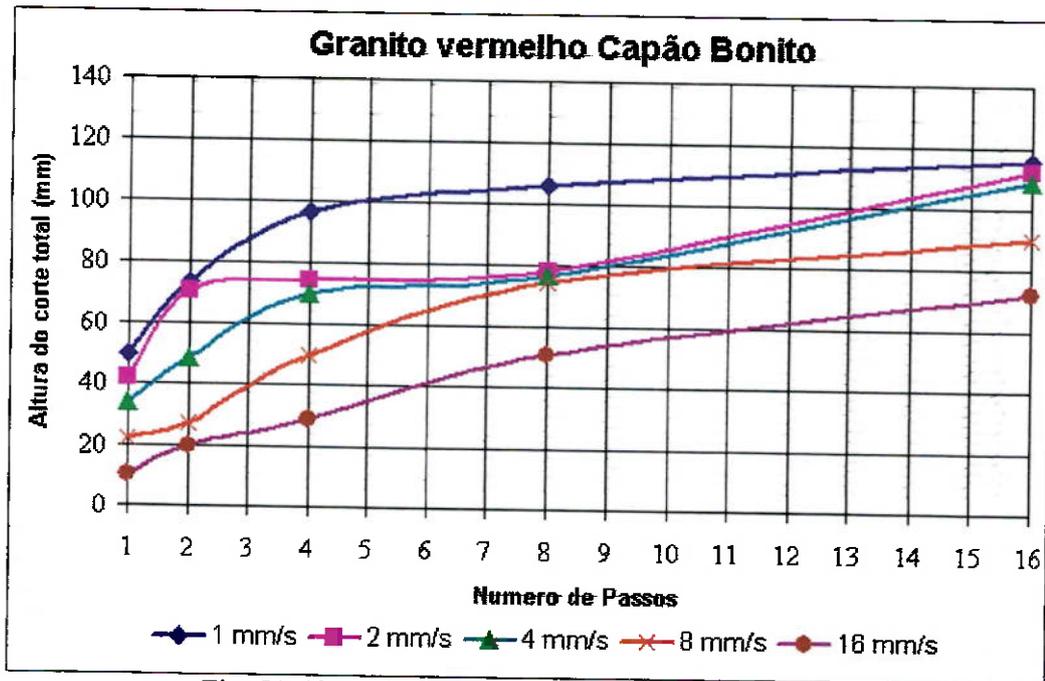


Fig. 51 Altura do corte total segundo Np por V para GVCB.

Igual que nas Fig. 45 e 47, o aumento da h liso se relaciona diretamente com o aumento do Np na Fig. 51.

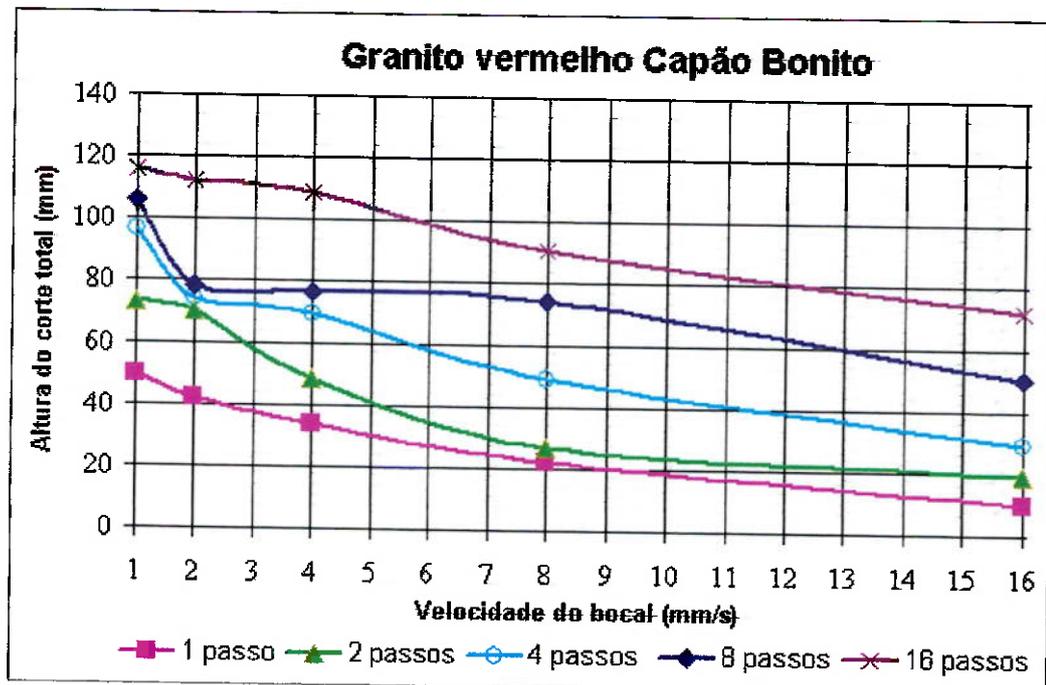


Fig. 52 Altura do corte total segundo V por Np para GVCB.

Igual que nas Fig. 46 e 48 de GPP e 50 de GCVB, o h total diminui com o aumento de V na Fig. 52. Neste caso a tendência é mais evidente.

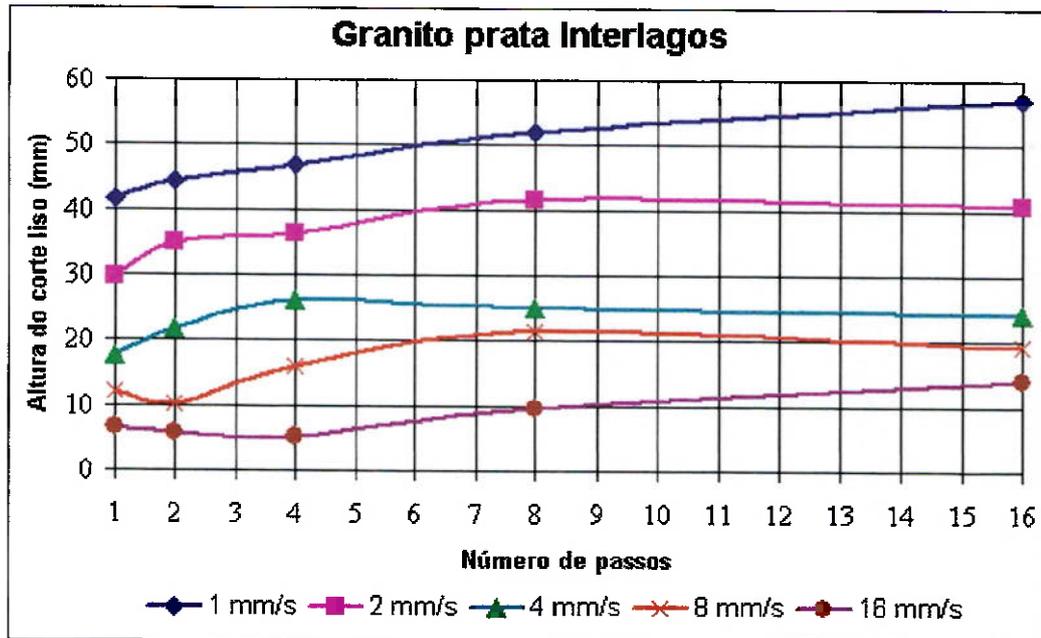


Fig. 53 Altura do corte liso segundo Np por V para GPI.

Na Fig. 53, para GPI, o aumento do Np é causa direta do aumento de h liso.

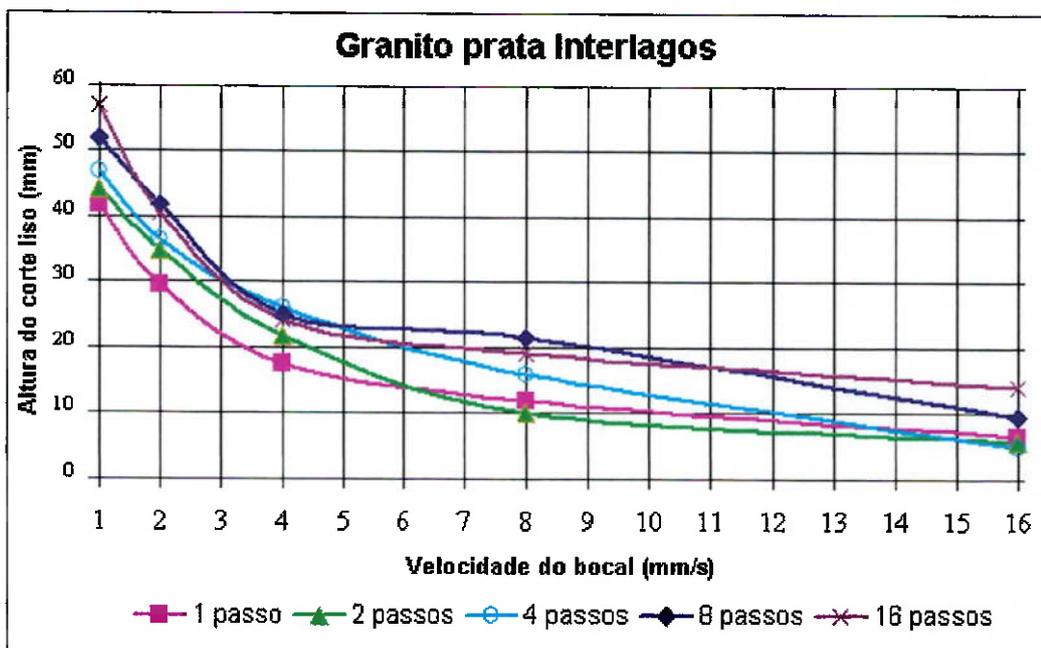


Fig. 54 Altura do corte liso segundo V por Np para GPI.

Como se pode ver na Fig. 54, nesta rocha os ensaios de corte se comportam da mesma forma que em casos anteriores, com o aumento da V diminui o h liso.

Dos três granitos ensaiados, a maior altura h de corte liso foi atingida no GPI com 57,10 mm na combinação  $V/Np = 1 \text{ (mm/s)/16}$ .

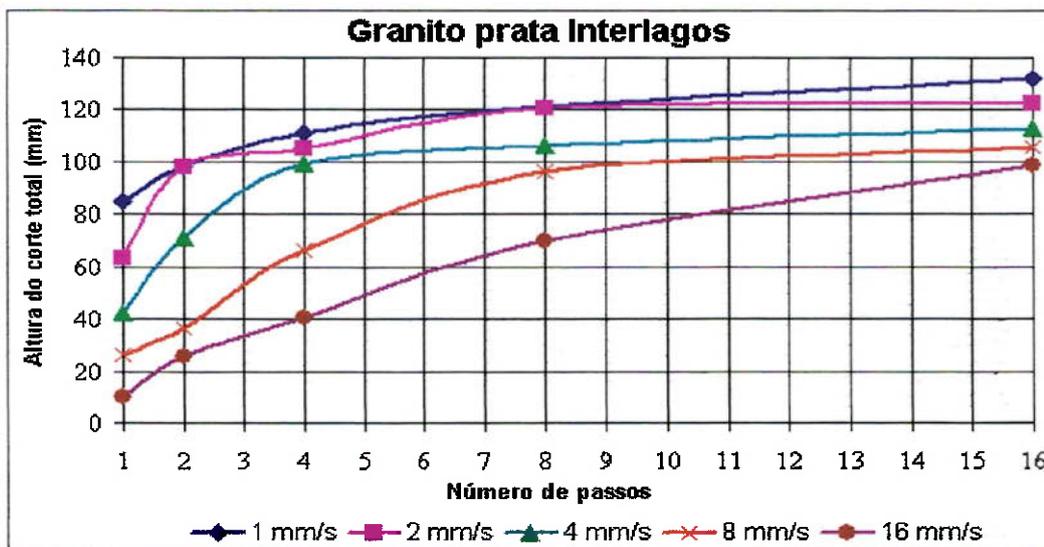


Fig. 55 Altura do corte total segundo Np por V para GPI.

Na Fig. 55, As combinações de Np = 8 com V = 8mm/s e 16 mm/s são as de melhores resultados. Nesta figura também se confere que com o aumento de Np aumenta o h total.

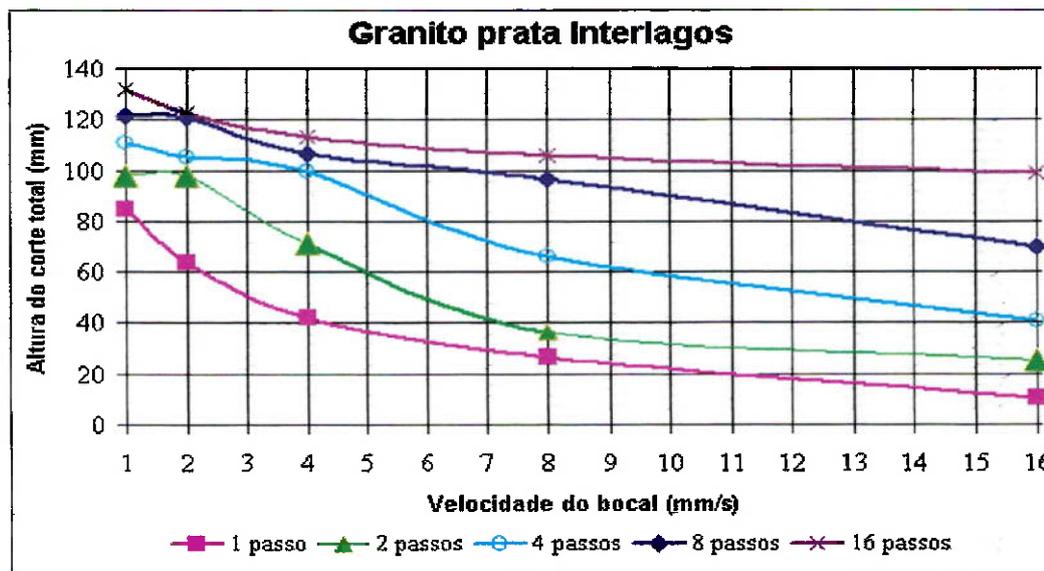


Fig. 56 Altura do corte total segundo V por Np para GPI.

Na Fig. 56, em GPI se repete o que aconteceu nos casos dos granitos GPP, e GVCB que com o aumento de V diminui o h total.

Dos três granitos testados, o maior h total foi atingido no GPI com 132,0 mm na combinação V/Np: 1 (mm/s)/16 quase atravessando o corpo de prova. Deve-se lembrar que a mesma combinação atravessou 130,0 mm do CP-2 de GPP, além de ter sido atravessado também nos cortes do ensaio 3 com qualidade 5 e com etch.

Tabela 29 Alturas do corte liso e do corte total no mármore.

Ensaio Nº	Dados				MBCJ	
	V (mm/s)	TTC (s)	Abrasivo (kg)	Np	h liso (mm)	h total (mm)
*1	1	200	1,06	1	51,24	119,4
2	4	50	0,27	1	22,6	56,99
*3	4	100	0,53	2	33,16	82,9
4	4	200	1,06	4	30,61	112,38
5	4	400	2,12	8	37,74	129,16
6	8	25	0,13	1	17,61	38,58
7	8	50	0,27	2	24,32	61,22
*8	8	100	0,53	4	23,21	82,07
9	8	200	1,06	8	25,16	118,25
10	16	12,5	0,07	1	11,74	26
11	16	25	0,13	2	11,74	38,58
12	16	50	0,27	4	13,42	62,9
*13	16	100	0,53	8	14,92	84,56
*14	32	100	0,53	16	5,8	82,9
*15	64	100	0,53	32	13,27	92,85

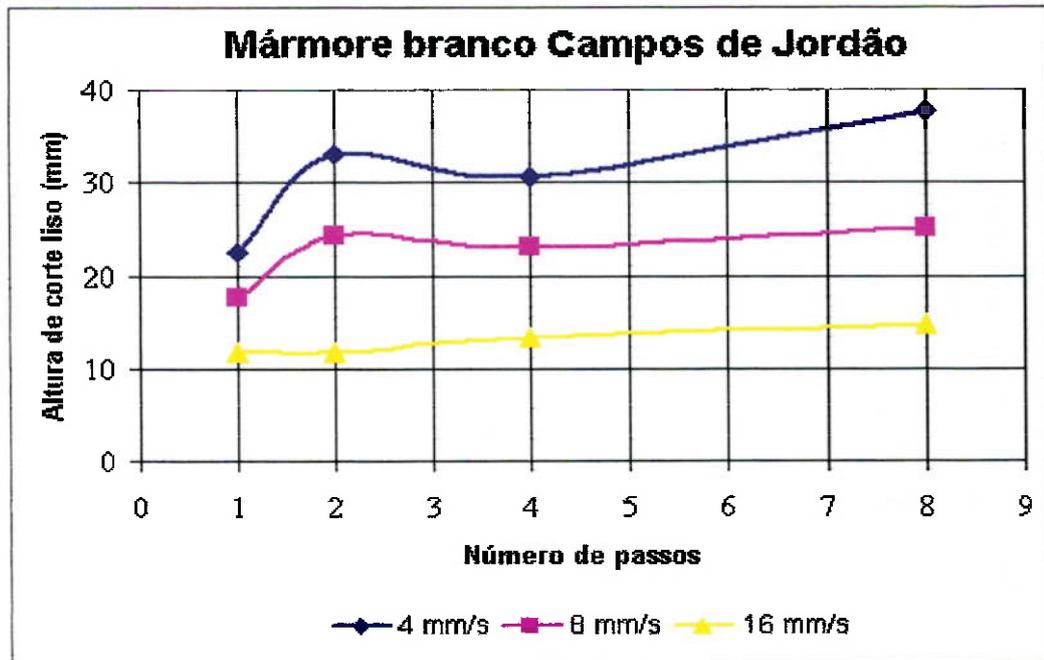


Fig. 57 Altura do corte liso segundo  $N_p$  por  $V$  para MBCJ.

Igual que no caso dos granitos, na Fig. 57 é conferido mais uma vez que o  $h$  liso aumenta com o aumento do  $N_p$ .

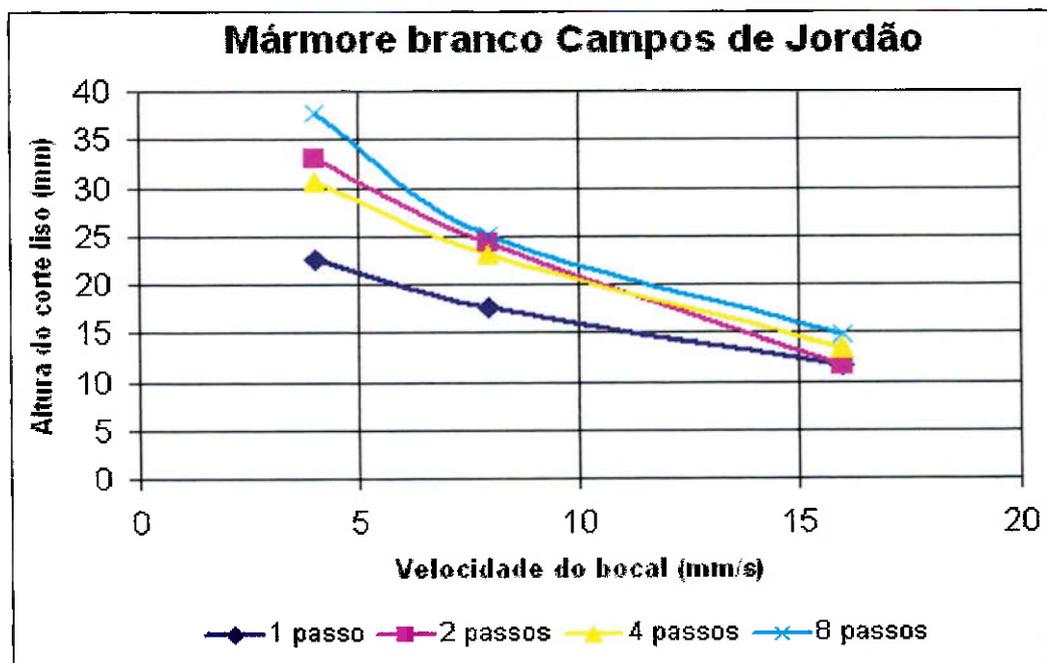


Fig. 58 Altura do corte liso segundo  $V$  por  $N_p$  em MBCJ.

Para o mármore, como no caso dos granitos, a altura  $h$  do corte liso resultante para cada combinação de  $V/N_p$ , (Fig. 58), diminui com o aumento da  $V$ .

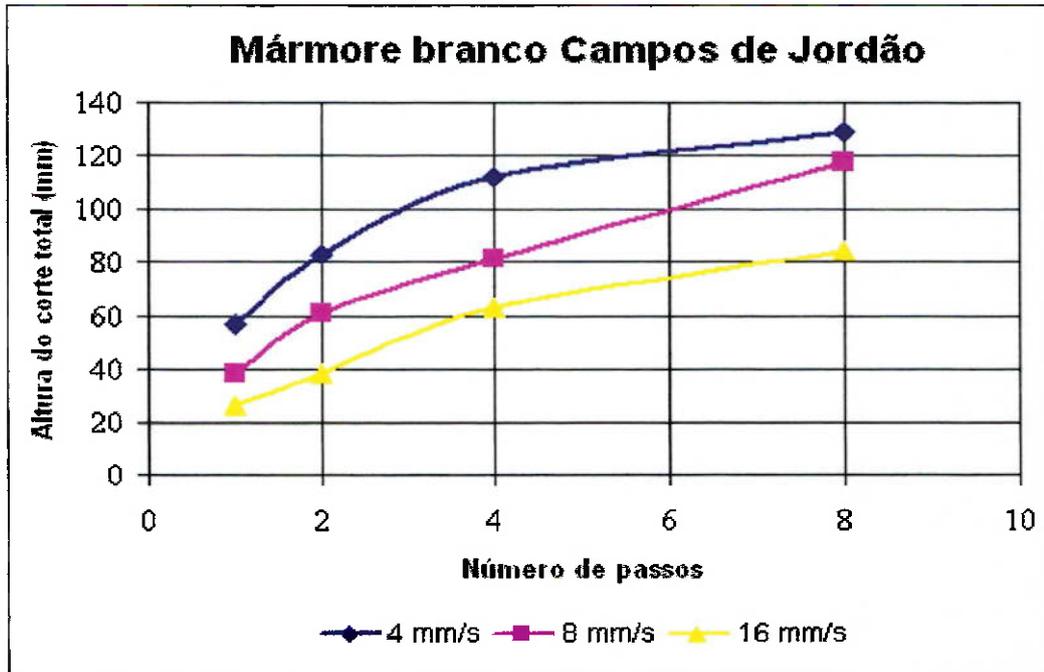


Fig. 59 Altura do corte total segundo Np por V para MBCJ

Na Fig. 59 se confirma mais uma vez que o aumento do Np implica no aumento da profundidade do corte (h total).

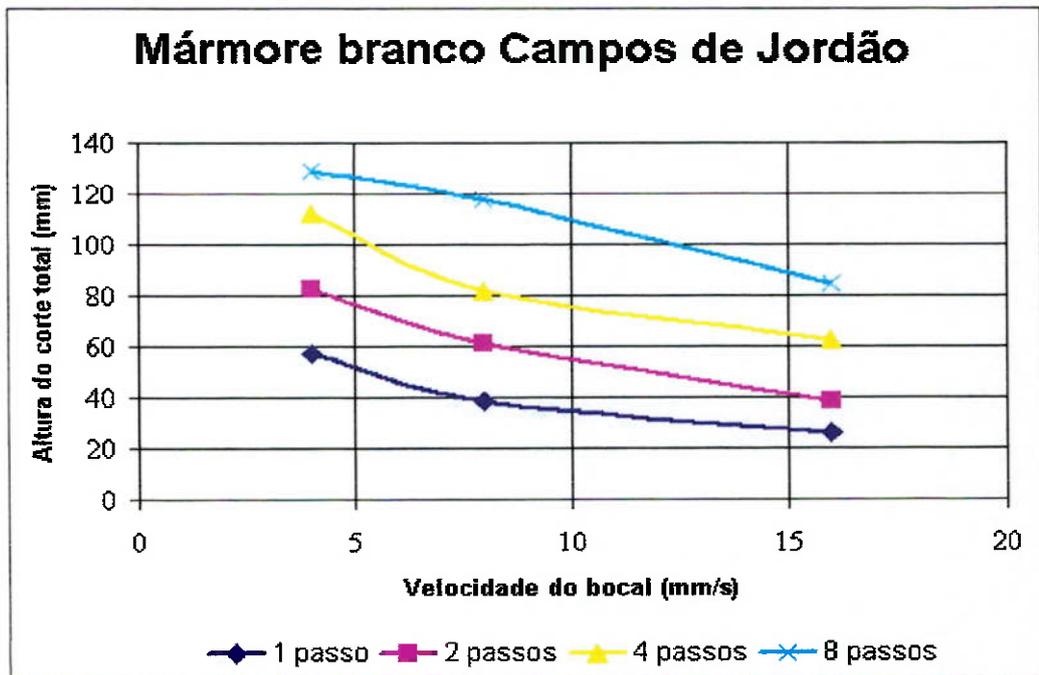


Fig. 60 Altura do corte total segundo V por Np para MBCJ

Na Fig. 60 se evidencia que o aumento de V implica a diminuição da profundidade do corte (h total).

4.3. Relação entre h liso e h total com o consumo de abrasivo

As Fig. 61, 62, 63, 64, apresentam h lisos e os h totais e o consumo de abrasivo em cada combinação V/Np.

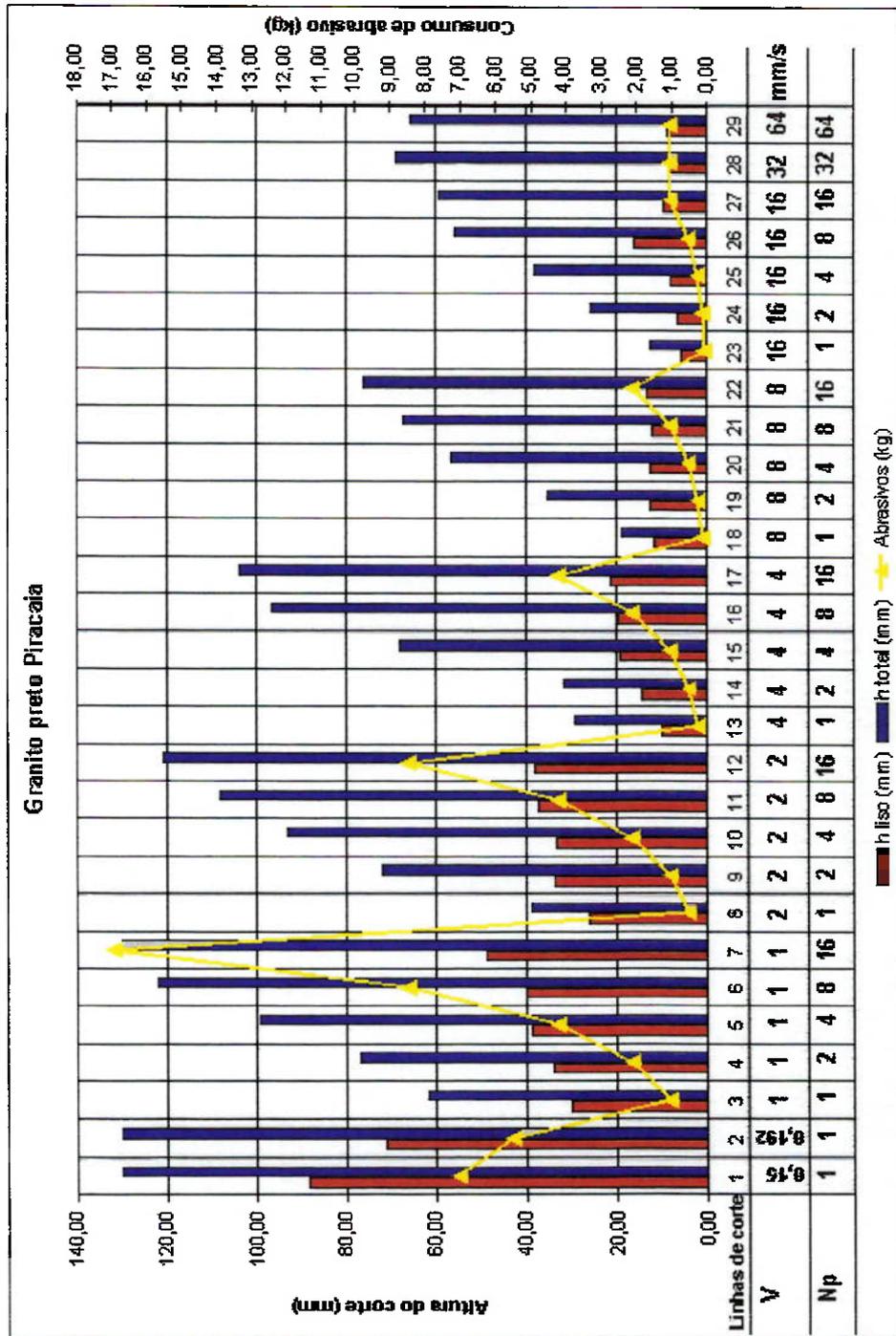


Figura 61 Relação entre h liso e h total com o abrasivo consumido no GPP

Destaca-se que no corte com V muito lenta (0,15 e 0,192 mm/s) e com um só

passo, o jato atravessou o corpo com muito menos abrasivo consumido (7,07 e 5,52 kg respectivamente) que com o jato mais rápido (1,0 e 2,0 mm/s) e 16 passadas (16,96 e 8,48 kg respectivamente).

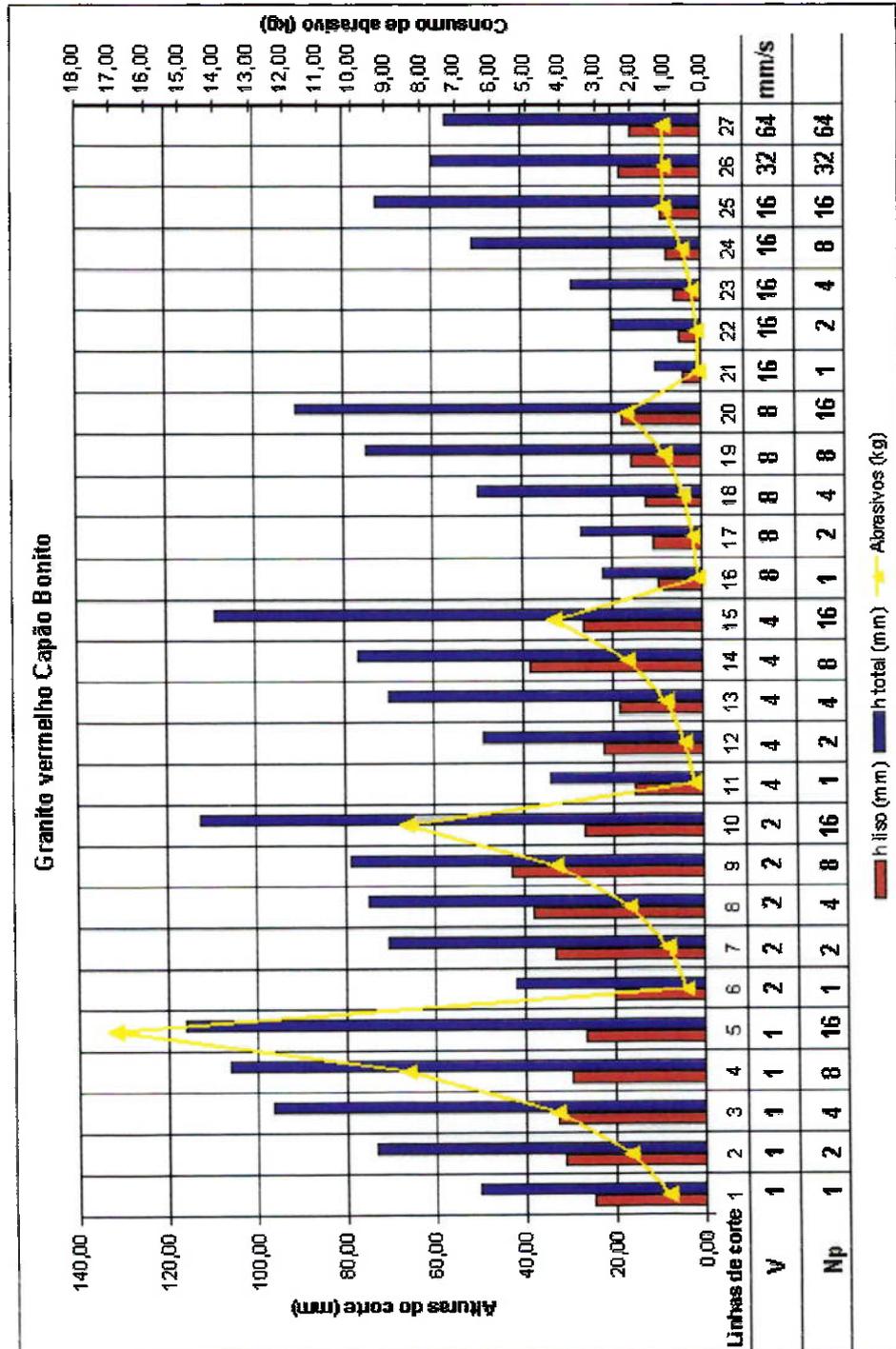


Figura 62 Relação entre h liso e h total com o abrasivo consumido no GVCB

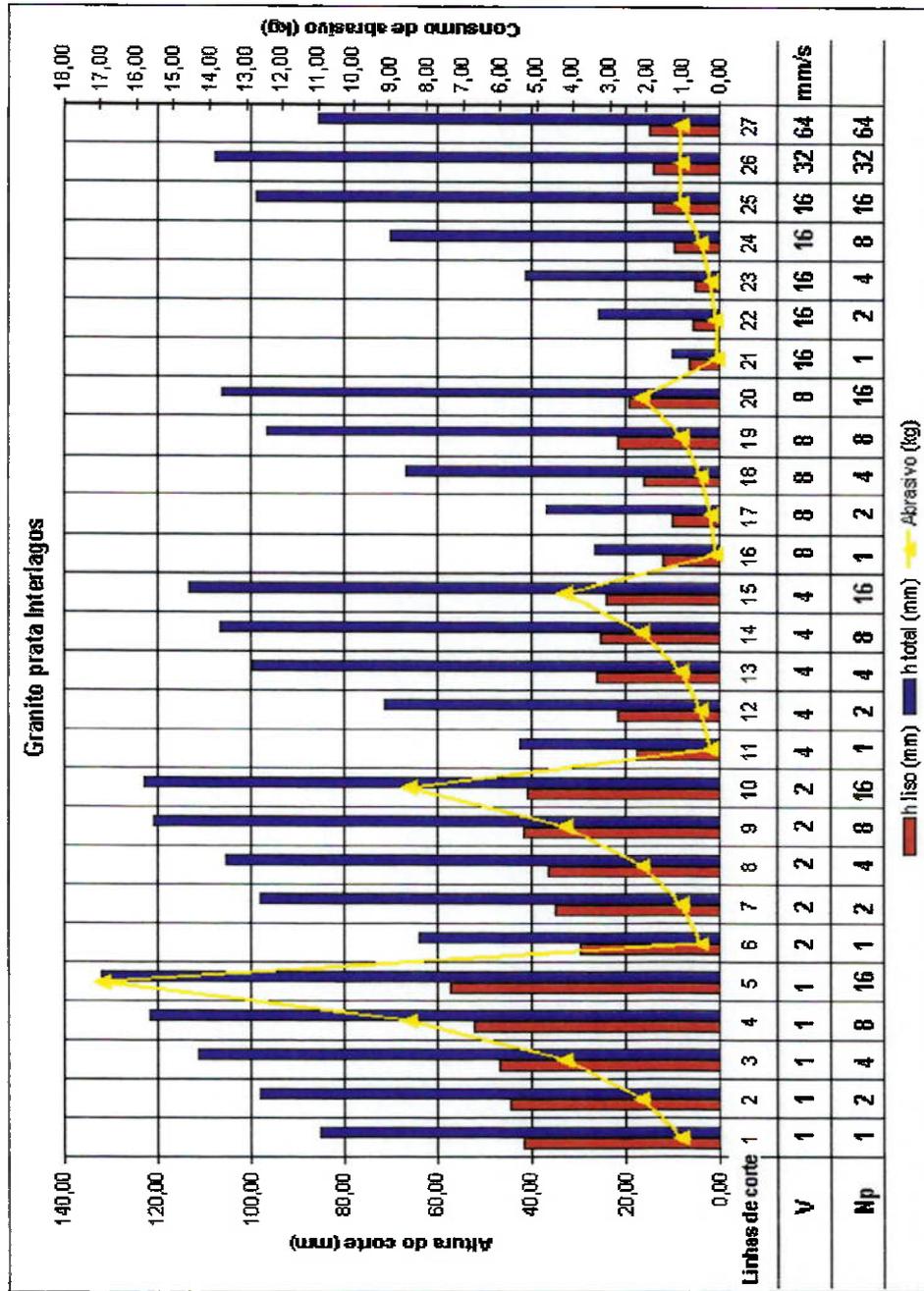


Figura 63 Relação entre h liso e h total com o abrasivo consumido no GPI

As maiores alturas obtidas nos três granitos, quando é aplicado o corte pelo método de múltiplos passos, são o produto das combinações das velocidades com 16 passos do bocal. A melhor combinação resultante é a de velocidade de 1 mm/s junto com  $N_p = 16$  passos do bocal.

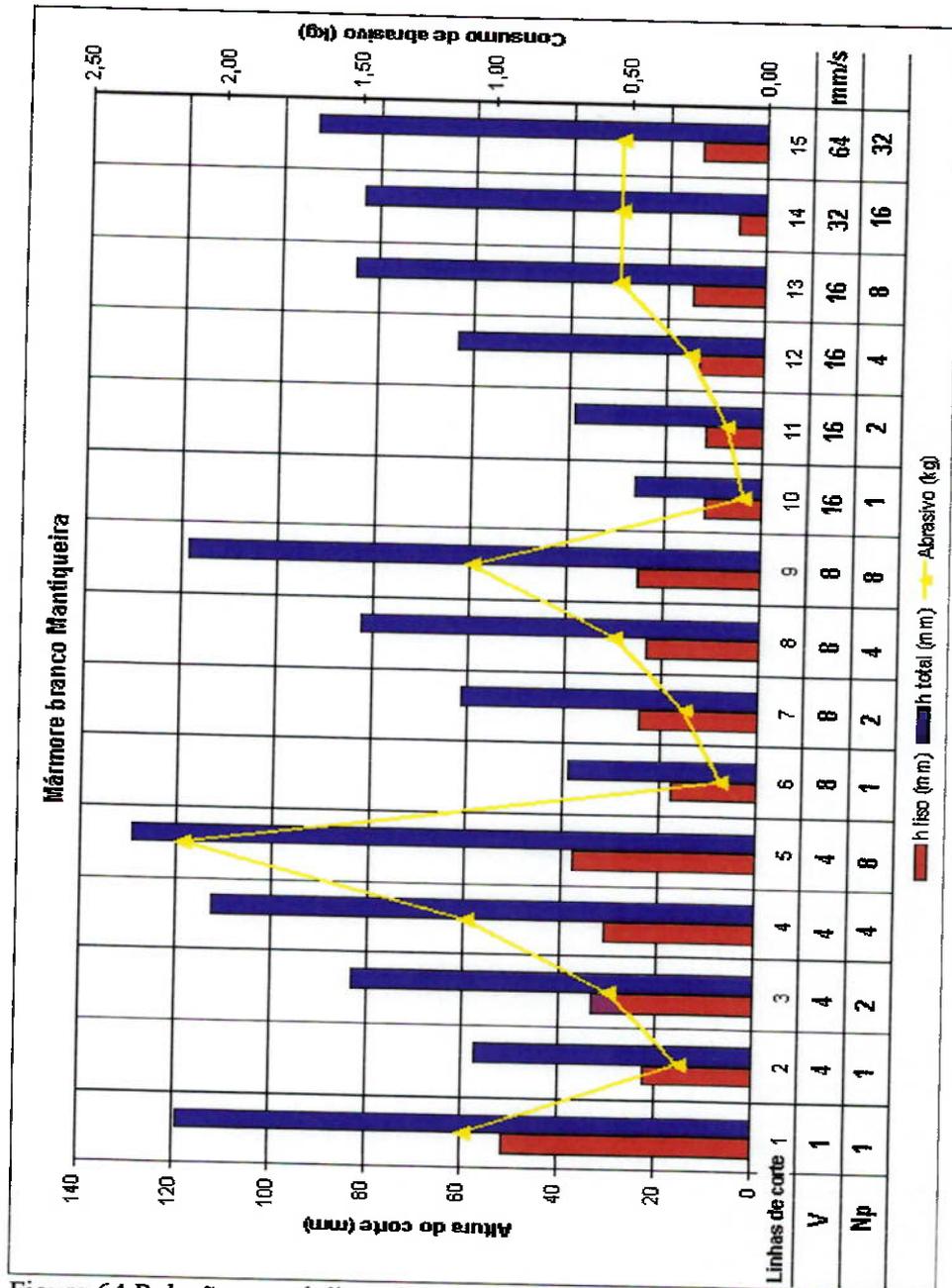


Figura 64 Relação entre h liso e h total com o abrasivo consumido no MBCJ

Em geral, no caso do MBCJ, as maiores alturas são resultado das combinações das velocidades com  $N_p = 8$  passos. A maior altura obtida 129,16 mm é resultado da combinação 4 mm/s e 8 passos. Destaca-se porém que a combinação 64 mm/s e 32 passos cortou  $h_{total} = 92,85$  mm, maior que o  $h_{total} = 84,56$  mm da combinação 16 mm/s e 8 passos, consumindo ambas 0,53 kg de abrasivo.

O consumo específico de abrasivo, e sua relação com o método de corte aplicado é mostrado na Tabela 30 e nos gráficos das Fig. 65 até 72:

## Resultados e Interpretação.

Tabela 30 Determinação do consumo específico de abrasivo por ensaio efetuado para cada rocha granítica utilizada. (1)

Ensaio Nº	Parâmetros			GPP			GVCB			GPI		
	V (mm/s)	Np	Abrasivo (kg)	h liso (mm)	h total (mm)	Abrasivo (kg/m <sup>2</sup> )	h liso (mm)	h total (mm)	Abrasivo (kg/m <sup>2</sup> )	h liso (mm)	h total (mm)	Abrasivo (kg/m <sup>2</sup> )
1	0,15	1	7,07	88,26	130,00	271,92	----	----	----	----	----	----
2	0,192	1	5,52	70,92	130,00	212,31	----	----	----	----	----	----
3	1	1	1,06	29,94	61,46	86,23	24,9	49,86	106,30	41,69	84,8	62,47
4	1	2	2,12	33,88	76,44	138,67	31,3	73,15	144,91	44,25	98,0	108,15
5	1	4	4,24	38,61	99,29	213,52	32,8	96,44	219,83	46,81	111,1	190,70
6	1	8	8,48	40,19	122,14	347,14	29,5	106,22	399,17	51,96	121,5	348,71
7	1	16	16,96	48,86	130,00	652,31	26,2	116,00	731,03	57,10	132,0	642,42
8	2	1	0,53	26,00	38,61	68,64	20,0	41,99	63,11	29,62	63,6	41,65
9	2	2	1,06	33,45	71,75	73,87	33,1	70,41	75,27	34,93	98,1	54,03
10	2	4	2,12	33,10	92,99	113,99	37,8	74,57	142,15	36,41	105,3	100,59
11	2	8	4,24	37,30	108,24	195,86	42,6	78,73	269,27	41,69	120,6	175,69
12	2	16	8,48	38,03	120,67	351,37	26,2	112,46	377,02	40,62	122,6	345,61
13	4	1	0,27	10,24	29,25	45,30	15,1	34,12	38,83	17,55	42,4	31,24
14	4	2	0,53	14,63	31,45	84,26	22,0	48,71	54,40	21,78	71,0	37,32
15	4	4	1,06	19,39	67,87	78,09	18,6	69,81	75,92	26,01	99,5	53,22

Nota: Todas as linhas possuem 200 mm de comprimento.

Tabela 30 Determinação do consumo específico de abrasivo por ensaio efetuado para cada rocha granítica utilizada. (2)

Ensaio Nº	Parâmetros			GPP			GVCB			GPI		
	V (mm/s)	Np	Abrasivo (kg)	h liso (mm)	h total (mm)	Abrasivo (kg/m <sup>2</sup> )	h liso (mm)	h total (mm)	Abrasivo (kg/m <sup>2</sup> )	h liso (mm)	h total (mm)	Abrasivo (kg/m <sup>2</sup> )
16	4		2,12	19,75	96,54	109,80	38,15	76,68	138,24	25,08	106,47	99,56
17	4	1	4,24	21,21	103,85	204,14	26,24	108,91	194,66	24,14	113,36	187,01
18	8		0,13	11,70	19,02	34,96	9,55	22,06	30,15	12,07	26,33	25,26
19	8		0,27	12,43	35,11	37,74	11,00	27,00	49,07	10,24	36,57	36,23
20	8		0,53	12,43	56,31	47,06	12,33	49,41	53,63	15,90	66,59	39,80
21	8		1,06	12,12	66,90	79,22	15,65	74,63	71,02	21,55	96,61	54,86
22	8	1	2,12	13,16	76,06	139,36	17,64	90,52	117,10	19,13	106,10	99,91
23	16		0,07	5,85	12,43	27,72	4,00	10,00	34,45	6,58	10,24	33,64
24	16		0,13	6,58	25,60	25,98	5,00	19,50	34,10	5,85	25,60	25,98
25	16		0,27	8,04	38,03	34,84	6,00	29,00	45,69	5,12	40,96	32,35
26	16		0,53	16,09	55,58	47,68	7,52	50,61	52,36	9,62	69,90	37,91
27	16	1	1,06	9,70	59,15	89,60	9,03	72,22	73,39	14,12	98,84	53,62
28	32	3	1,06	8,24	68,84	76,99	18,05	59,58	88,96	14,12	107,76	49,18
29	64	6	1,06	8,72	65,45	80,98	15,65	56,57	93,69	14,86	85,46	62,02

Nota: Todas as linhas possuem 200 mm de comprimento.

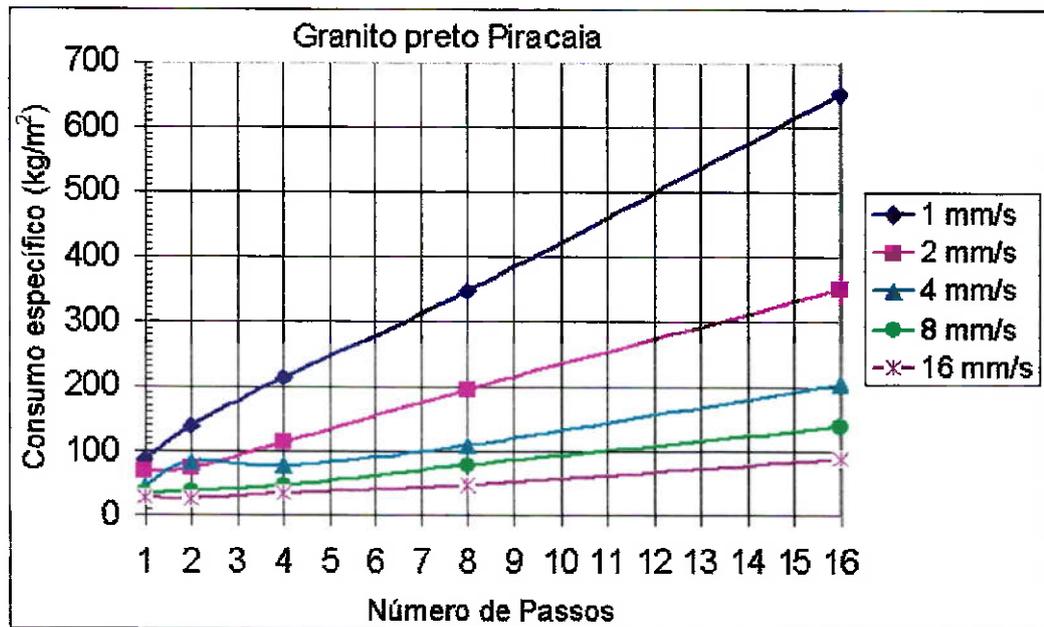


Fig. 65. Granito preto Piracaia. Aumento do consumo específico de abrasivo com o aumento do número de passos, por velocidade do bocal aplicada.

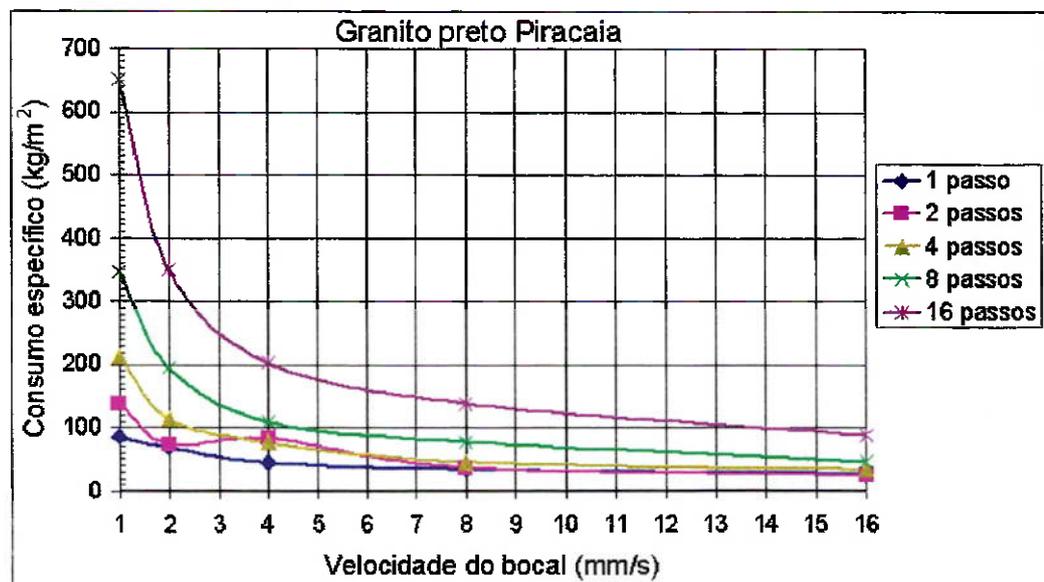


Fig. 66. Granito preto Piracaia. Diminuição do consumo específico de abrasivo com aumento da velocidade do bocal, segundo o número de passos aplicado.

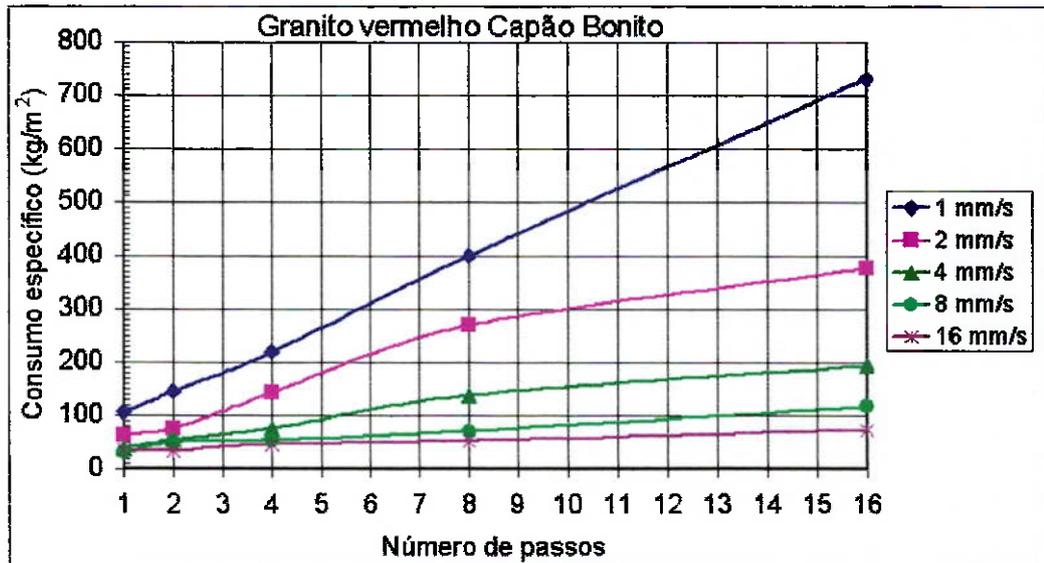


Fig. 67. Granito vermelho Capão Bonito. Aumento do consumo específico de abrasivo segundo aumenta o número de passos, por velocidade do bocal aplicada.

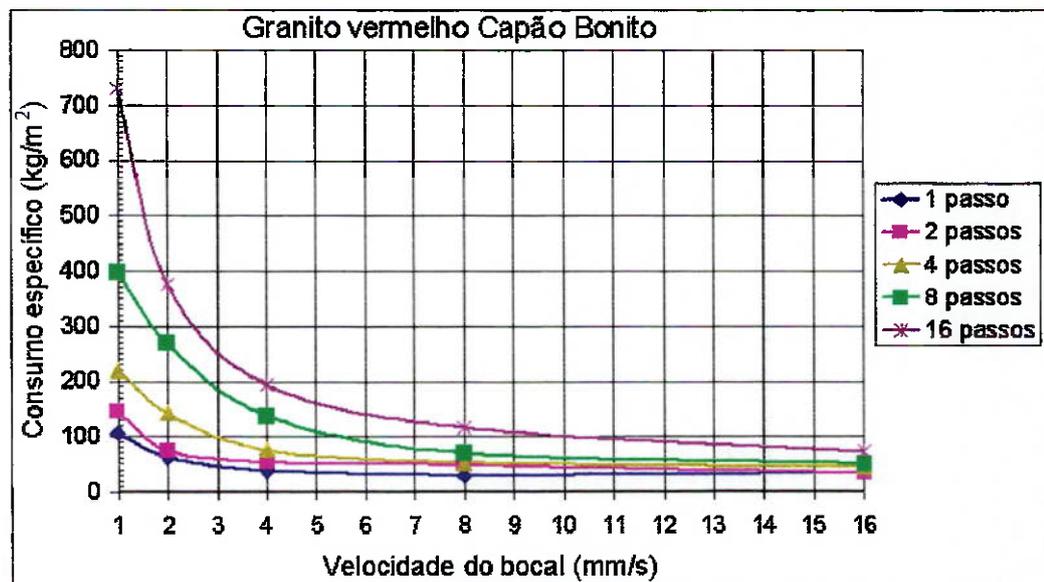


Fig. 68. Granito vermelho Capão Bonito. Diminuição do consumo específico de abrasivo com aumento da velocidade do bocal, segundo o número de passos aplicado.

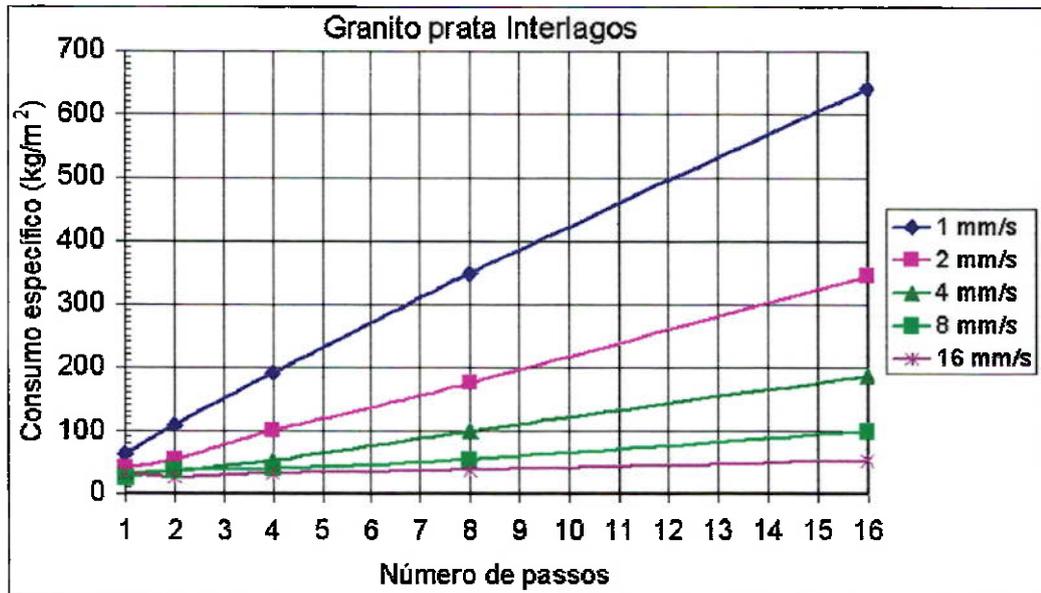


Fig. 69. Granito prata Interlagos. Aumento do consumo específico de abrasivo segundo aumenta o número de passos, por velocidade do bocal aplicada.

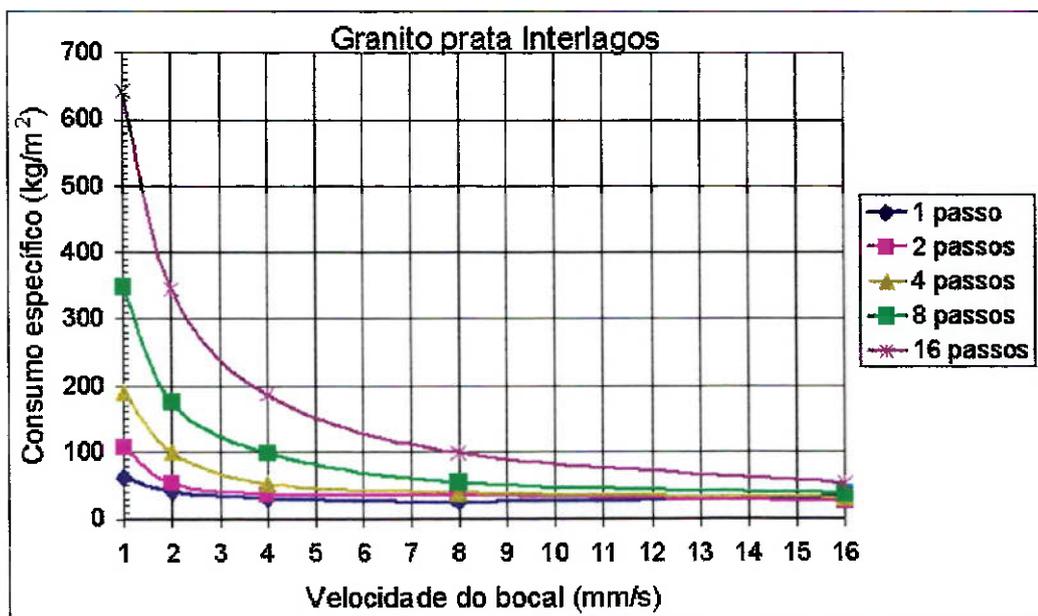


Fig. 70. Granito prata Interlagos. Diminuição do consumo específico de abrasivo com aumento da velocidade do bocal, segundo o número de passos aplicado.

Tabela 31 Determinação do consumo específico de abrasivo  
por ensaio efetuado para MBCJ.

Ensaio N°	V (mm/s)	Np	Abrasivo (kg)	h liso (mm)	h total (mm)	Abrasivo (kg/m <sup>2</sup> )
1	1	1	1,06	51,24	119,4	44,39
2	4	1	0,27	22,6	56,99	23,69
3	4	2	0,53	33,16	82,9	31,97
4	4	4	1,06	30,61	112,38	47,16
5	4	8	2,12	37,74	129,16	82,07
6	8	1	0,13	17,61	38,58	16,85
7	8	2	0,27	24,32	61,22	22,05
8	8	4	0,53	23,21	82,07	32,29
9	8	8	1,06	25,16	118,25	44,82
10	16	1	0,07	11,74	26	13,46
11	16	2	0,13	11,74	38,58	16,85
12	16	4	0,27	13,42	62,9	21,46
13	16	8	0,53	14,92	84,56	31,34
14	32	16	0,53	5,8	82,9	31,97
15	64	32	0,53	13,27	92,85	28,54

Nota 1: Todas as linhas possuem 200 mm de comprimento.

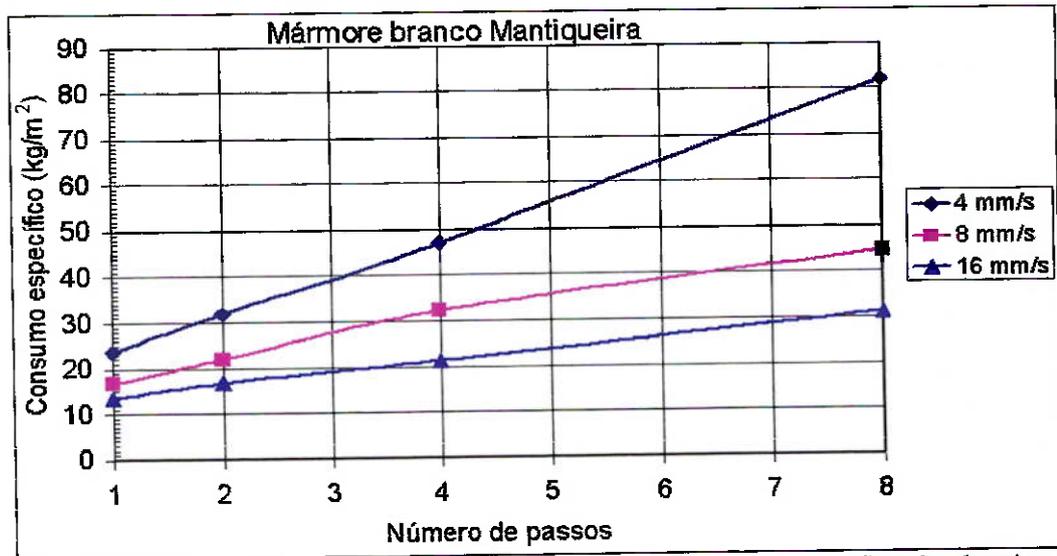


Fig. 71. Mármore branco Mantiqueira. Aumento do consumo específico de abrasivo segundo aumenta o número de passos, por velocidade do bocal aplicada.

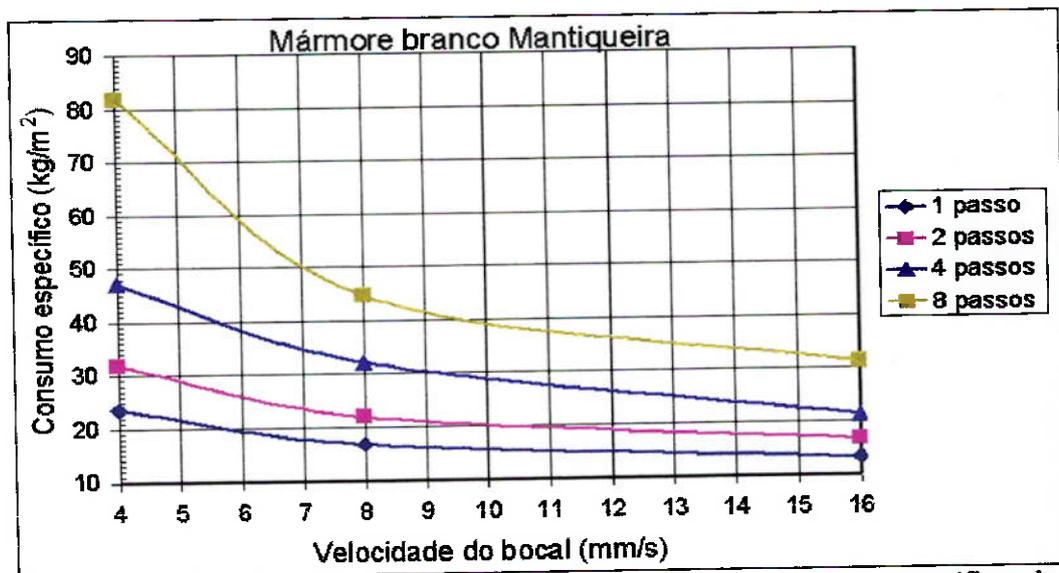


Fig. 72. Mármore branco Mantiqueira. Diminuição do consumo específico de abrasivo com aumento da velocidade do bocal, segundo o número de passos aplicado.

Em todos os casos, é possível comprovar que o consumo específico de abrasivo aumenta com o aumento do número de passos o que explica o aumento da altura de corte em função deste parâmetro. Por sua vez, conforme aumenta a velocidade do bocal, diminui o consumo específico de abrasivo o que explica a diminuição da altura de corte em função deste parâmetro.

## 4.4. Avaliação da qualidade (rugosidade) do corte.

Tabela 32 Granito preto Piracaia. Parâmetros para avaliação de Rugosidade

V (mm/s)	Np	h liso	h total	Abrasivo (kg)	Perfil	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )	Rmax ( $\mu\text{m}$ )	Rk ( $\mu\text{m}$ )	Rp ( $\mu\text{m}$ )	Pt ( $\mu\text{m}$ )	Wt ( $\mu\text{m}$ )
0,15	1	88,26	130,00	7,07	10	6,1	40,0	52,2	19,4	17,2	80,4	38,5
					20	9,6	54,0	63,3	34,0	24,9	94,1	34,0
					30	8,5	44,6	53,9	31,7	23,7	77,5	43,3
					40	10,7	54,8	69,0	38,3	27,8	112,9	59,4
					50	12,5	60,0	67,6	50,8	30,1	157,0	88,3
					60	13,6	63,3	76,4	59,7	33,7	166,2	94,0
					70	18,0	79,7	86,4	70,2	39,8	217,7	126,6
					80	24,1	96,9	122,8	71,1	57,4	304,3	191,2
					90	34,2	144,5	173,8	114,7	88,3	398,1	263,7
					100	40,1	168,6	205,2	121,0	101,8	498,2	308,5
					110	54,9	191,5	252,8	183,4	110,2	584,0	375,4
0,192	1	70,92	130,00	5,52	10	7,8	44,3	59,4	28,7	20,8	85,1	25,6
					20	8,7	43,0	49,9	29,6	18,8	84,2	41,4
					30	10,5	55,7	63,2	34,9	24,9	93,7	42,1
					40	12,1	66,1	85,0	41,4	33,3	154,0	87,9
					50	15,1	71,3	84,4	60,1	35,4	195,6	132,0
					60	18,5	87,3	119,0	65,8	44,4	240,5	162,5
					70	28,4	129,5	173,2	102,2	74,8	362,2	222,9
					80	34,6	155,8	291,9	105,1	80,4	544,9	304,9
					90	67,0	277,1	392,9	271,3	162,0	623,0	494,1
2	2	33,45	71,75	1,06	10	8,7	50,8	64,8	29,3	23,5	100,3	57,8
					20	21,1	110,0	147,9	69,0	61,8	277,3	156,4
					30	40,9	158,8	193,6	139,0	68,7	643,9	491,0
4	4	19,39	67,87	1,06	10	12,4	64,7	75,5	41,8	30,1	136,3	71,1
					20	23,8	113,8	232,4	76,9	59,7	604,2	469,4
					40	23,8	94,1	154,7	71,9	41,7	502,3	465,5
8	8	12,12	66,90	1,06	10	9,8	49,7	65,9	33,9	23,5	153,0	107,3
					22,5	19,2	83,9	151,8	57,8	35,7	502,5	372,8
16	16	9,70	59,15	1,06	10	25,8	121,9	152,0	75,7	61,3	589,0	472,9
					20	37,1	179,1	434,7	67,9	71,0	673,1	305,3
					30	26,2	119,9	236,4	84,1	54,3	519,0	394,3
32	32	8,24	68,84	1,06	10	35,4	163,0	261,4	81,6	86,5	443,9	351,9
					15	40,7	200,7	452,7	74,0	88,8	955,7	714,9
64	64	8,72	65,45	1,06	10	17,4	90,5	187,5	54,3	34,2	285,6	151,8

Nota: o perfil 30 da combinação  $V = 4$  mm/s,  $N_p = 4$ , não foi avaliado por estar fora de escala ( $>2500,0$   $\mu\text{m}$ ) para o estilete do Perthometro. O mesmo acontece nos perfis 20 da combinação  $V = 8$  mm/s,  $N_p = 8$  e 20 de  $V = 32$  mm/s,  $N_p = 32$ . Nas combinações de  $V/N_p$ : 2/2, 4/4, 8/8, 16/16, 32/32, 64/64 a quantidade de perfis avaliados é menor que nas combinações 0,15/1 e 0,192/1, sempre por ultrapassar o limite do estilete do Perthometro.

As definições dos parâmetros de rugosidade  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ ,  $R_k$ ,  $R_p$ ,  $P_t$  e  $W_t$  aparecem no capítulo anterior sobre Material e Métodos.

O gráfico da Fig. 73 apresenta os Indicadores de Rugosidade por combinação  $V/N_p$  para os ensaios em Granito preto Piracaia.

A profundidade média da rugosidade  $R_z$  e a profundidade máxima de rugosidade  $R_{max}$  se encontram no gráfico da esquerda da Fig. 73, enquanto que a profundidade de nivelção  $R_p$  ou distância entre o pico mais alto do perfil e a linha de referência, a profundidade do perfil  $P_t$ , e a profundidade da ondulação  $W_t$  se encontram no gráfico da direita da própria Fig. 73.

Desta Fig. 73 é possível comprovar que:

A profundidade média da rugosidade ( $R_z$ ) aumenta com o aumento da altura de corte o que se percebe em cada combinação com exceção da combinação 16/16, onde os perfis 10 e 30 mm são praticamente iguais.

A profundidade máxima da rugosidade ( $R_{max}$ ) aumenta com o aumento da altura do corte.

A profundidade de nivelção ( $R_p$ ) aumenta também, porém muito menos evidente que nos casos anteriores.

A profundidade do perfil ( $P_t$ ) aumenta em quase todas as combinações menos na 16/16 que diminui.

Finalmente a profundidade da ondulação ( $W_t$ ) apresenta resultados parecidos com os de  $P_t$ . No perfil 15 da combinação 32/32, o perfil apresenta o maior valor, diminuindo nos perfis restantes.

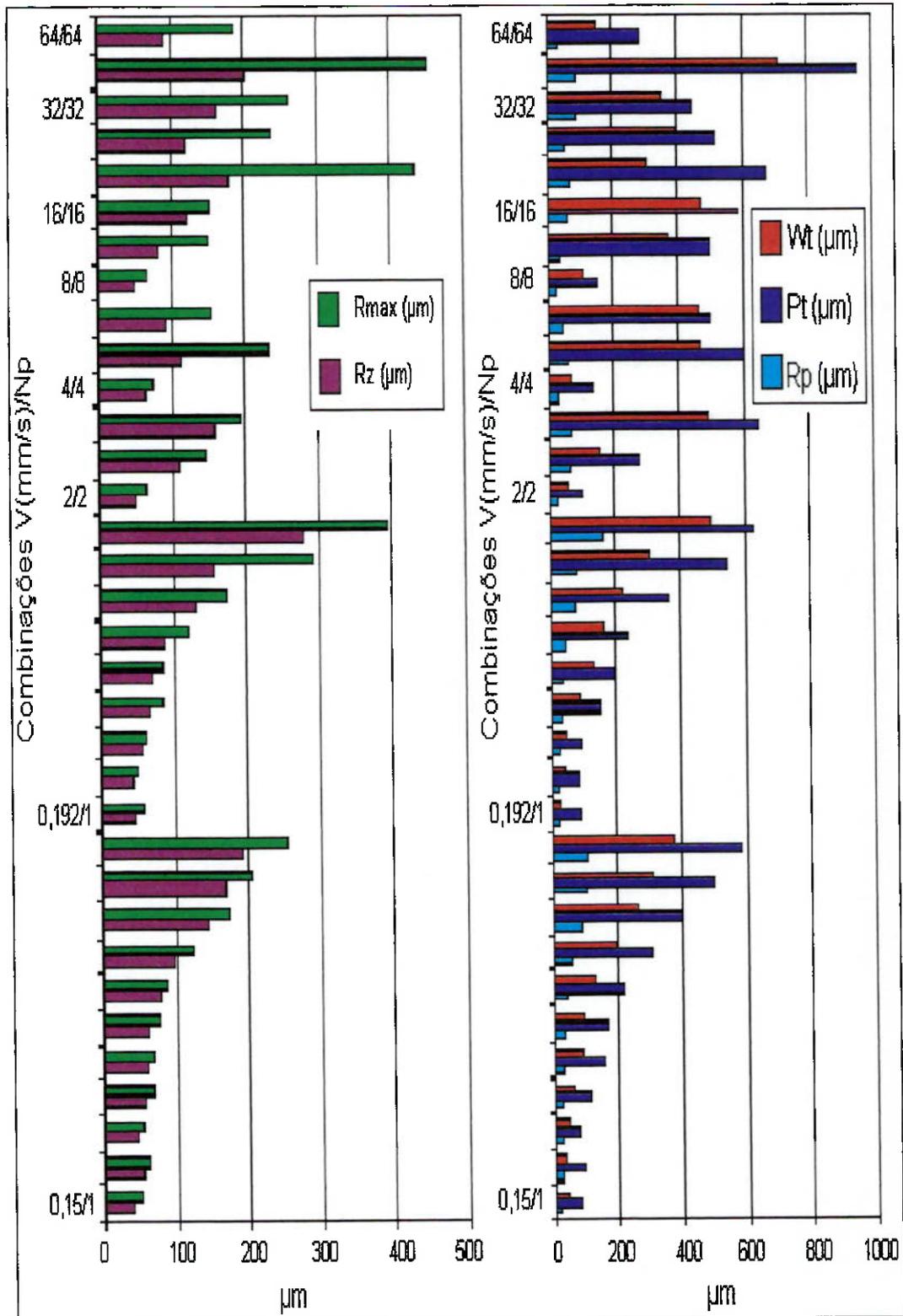


Fig. 73 Indicadores de rugosidade em Granito preto Piracaiá.

Tabela 33 Granito vermelho Capão Bonito. Parâmetros para avaliação de Rugosidade

V (mm/s)	Np	h liso	h total	Abrasivo (kg)	Perfil	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )	Rmax ( $\mu\text{m}$ )	Rk ( $\mu\text{m}$ )	Rp ( $\mu\text{m}$ )	Pt ( $\mu\text{m}$ )	Wt ( $\mu\text{m}$ )
2	2	33,10	70,41	1,06	10	10,1	60,3	80,6	32,5	27,2	157,5	72,0
					20	10,8	57,2	64,2	40,9	24,6	173,0	107,0
					30	15,0	74,8	121,8	37,1	38,0	249,0	170,4
4	4	18,66	69,81	1,06	10	6,0	37,1	53,3	18,9	16,8	80,1	32,7
					20	13,6	73,2	100,4	43,6	41,4	228,9	154,3
8	8	15,65	74,63	1,06	10	15,6	81,3	103,6	43,5	33,6	167,8	97,7
					20	27,8	119,0	243,4	80,7	63,2	725,6	620,1
					30	34,9	165,9	260,9	122,5	68,4	831,8	756,4
16	16	9,03	72,22	1,06	10	27,0	136,0	196,5	58,0	63,5	763,9	712,6
					20	20,1	102,4	147,7	52,8	49,6	501,6	455,9
32	32	18,05	59,58	1,06	10	14,3	74,5	106,7	50,0	34,0	388,3	302,1
64	64	15,65	56,57	1,06	10	9,5	53,7	92,3	25,6	23,2	188,3	125,1

Nota: Nas combinações de V/Np: 2/2 e 8/8 foi possível a avaliação dos perfis 10, 20 e 30, os perfis restantes possíveis ultrapassam o limite de 2.500  $\mu\text{m}$ , impedindo a avaliação. As combinações 4/4 e 16/16 permitiram avaliar os perfis 10 e 20. Nas combinações 32/32 e 64/64 apenas o perfil 10 foi avaliado, porém no é representado graficamente.

Na Fig. 74 a profundidade média da rugosidade (Rz) apresenta resultados estáveis e similares em todas as combinações V/Np.

A profundidade máxima da rugosidade (Rmax) aumenta até a combinação 8/8, diminuindo posteriormente.

A profundidade de nivelção ou índice de rugosidade (Rp) apresenta valores parecidos em todas as combinações e alturas dos cortes, aumentando muito pouco.

A profundidade do perfil (Pt) e a profundidade da ondulação (Wt) apresentam resultados parecidos ao parâmetro anterior aumentando até o perfil 30 e diminuindo logo nas combinações restantes.

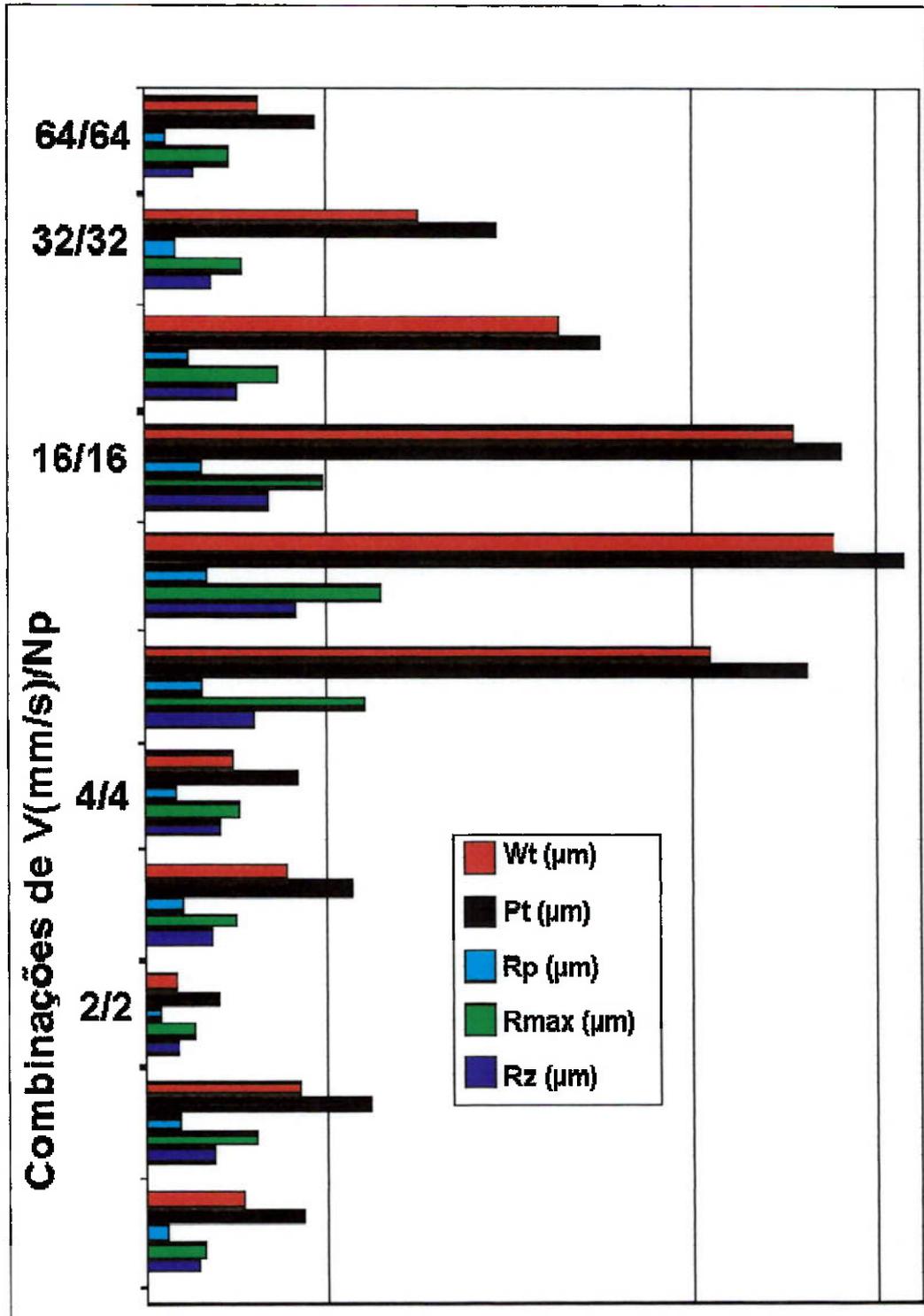


Fig. 74 Indicadores de rugosidade, em Granito vermelho Capão Bonito.

Tabela 34 Granito prata Interlagos. Parâmetros para avaliação de Rugosidade.

V (mm/s)	Np	h liso	h total	Abrasivo (kg)	Perfil	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )	Rmax ( $\mu\text{m}$ )	Rk ( $\mu\text{m}$ )	Rp ( $\mu\text{m}$ )	Pt ( $\mu\text{m}$ )	Wt ( $\mu\text{m}$ )
2	2	34,93	98,10	1,06	10	9,0	53,6	72,2	30,4	23,	101,5	46,8
					20	10,7	62,4	74,2	36,9	29,	119,6	67,6
					30	15,1	74,0	79,8	61,5	37,	175,3	112,3
					40	32,5	144,0	219,4	108,8	75,	485,4	334,5
					50	33,3	141,8	184,0	126,5	72,	492,4	347,6
4	4	26,01	99,58	1,06	10	9,8	54,9	75,8	27,9	22,	97,0	42,0
					20	10,5	59,7	80,7	36,6	26,	136,6	102,2
					30	17,7	86,7	134,7	44,4	40,	409,9	311,3
8	8	21,55	96,61	1,06	10	6,7	40,1	54,2	22,0	17,	123,0	85,4
					20	25,8	111,5	179,4	64,8	52,	571,6	450,1
					30	21,2	113,5	206,3	65,3	40,	699,9	528,4
					40	11,0	64,7	88,8	35,7	29,	199,1	118,7
16	16	14,12	98,84	1,06	10	7,5	44,9	52,0	27,5	20,	90,6	49,3
					20	18,6	94,8	139,6	58,1	42,	356,4	199,6
					30	34,9	152,0	218,5	97,8	72,	1061,0	941,5
					40	21,1	93,7	131,1	71,4	43,	422,8	325,8
32	32	14,12	107,76	1,06	10	18,9	81,6	113,4	54,3	33,	366,8	268,4
					20	25,5	111,8	133,5	103,0	54,	448,2	378,9
64	64	14,86	85,46	1,06	10	7,6	46,5	60,3	26,9	20,	151,1	103,3
					20	16,5	81,9	131,7	60,7	42,	524,1	444,0

Nota: Neste granito pôde-se verificar maior quantidade de perfis que nos anteriores. Isto se deve ao fato da combinação V/Np: 2/2 avaliar os perfis 10, 20, 30, 40, e 50, as combinações 8/8 e 16/16 permitir um perfil a menos, a 4/4 avaliar os perfis 10, 20 e 30. Mas o fato é que as combinações 32/32 e 64/64 conseguiram avaliar os perfis 10 e 20. Um perfil a mais que os granitos anteriores.

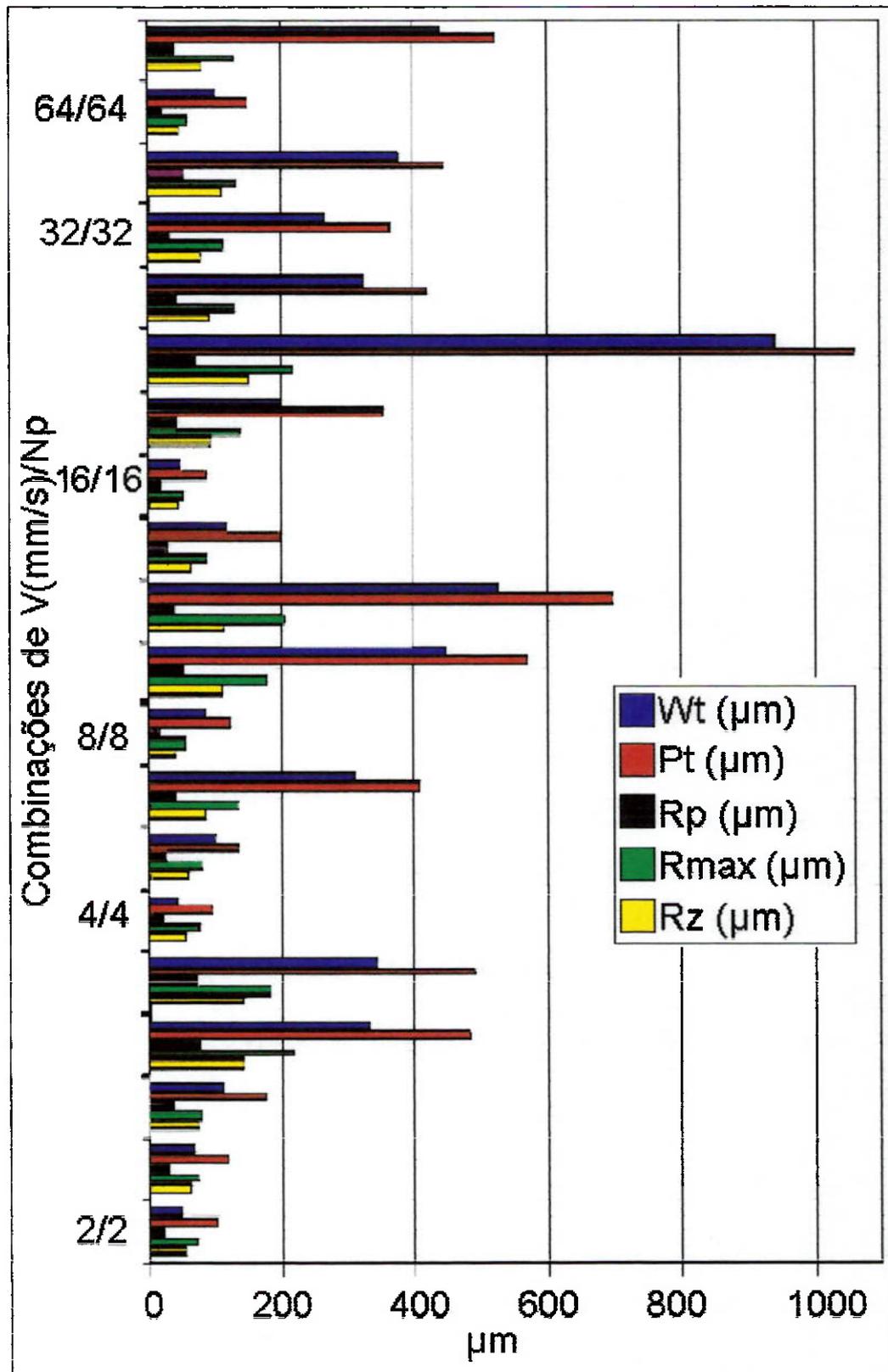


Fig. 75 Indicadores de rugosidade em Granito prata Interlagos

Na Fig. 75 a profundidade média da rugosidade (Rz) apresenta resultados similares para todas as combinações de V(mm/s)/Np. A profundidade máxima da rugosidade (Rmax) apresenta resultados parecidos para todas as combinações. O índice de rugosidade ou profundidade de nivelção (Rp) não aumenta e ainda diminui nas combinações mais rápidas. A profundidade do perfil (Pt) aumenta nas combinações 2/2 e 4/4, porém na 8/8 e na 16/16 diminui no último perfil, nas últimas combinações volta a aumentar. Finalmente a profundidade da ondulação (Wt) se comporta de modo semelhante ao parâmetro anterior.

Tabela 35 Mármore branco Mantiqueira. Parâmetros para avaliação de Rugosidade.

V (mm/s)	Np	h liso	h total	abrasivo (kg)	Perfil	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )	Rmax ( $\mu\text{m}$ )	Rk ( $\mu\text{m}$ )	Rp ( $\mu\text{m}$ )	Pt ( $\mu\text{m}$ )	Wt ( $\mu\text{m}$ )
1	1	51,24	119,4	1,0	10	12,5	73,1	79,	42,7	29,0	116,1	38,9
					20	11,0	62,6	79,	35,1	28,5	104,4	37,8
					30	12,5	70,0	110,	38,3	31,6	137,8	61,2
					40	16,5	81,2	113,	58,6	42,1	186,0	106,4
					50	22,9	111,2	127,	71,6	57,4	270,4	159,5
					60	29,3	135,0	165,	107,0	66,7	366,2	218,4
4	2	33,16	82,9	0,5	10	12,7	79,2	100,	35,2	32,3	121,2	31,7
					20	11,3	65,3	85,	37,8	28,1	121,0	58,9
					30	18,0	82,9	119,	54,6	39,4	211,0	162,5
					40	38,8	148,0	214,	117,5	76,1	835,1	725,1
8	4	23,21	82,07	0,5	10	10,1	60,7	96,	30,1	23,8	115,4	43,0
					20	15,0	81,6	107,	40,9	35,9	265,2	174,0
					40	11,6	70,3	91,	36,6	30,7	236,7	180,5
16	8	14,92	84,56	0,5	10	13,3	82,2	99,	38,5	33,0	158,1	72,3
					20	28,7	135,7	195,	81,6	59,8	542,9	417,6
					30	20,4	94,1	126,	71,4	49,0	469,1	397,0
					40	37,5	175,5	274,	161,7	68,1	955,4	722,2
32	16	5,8	82,9	0,5	10	9,0	53,4	61,	28,5	24,0	145,9	83,3
					20	13,0	62,7	72,	49,3	28,1	150,3	80,3
					30	16,9	83,6	107,	51,4	33,6	634,5	523,7
64	32	13,27	92,85	0,5	10	12,5	73,5	98,	51,4	31,0	249,6	199,6
					20	28,2	146,3	389,	48,7	62,7	871,6	753,6

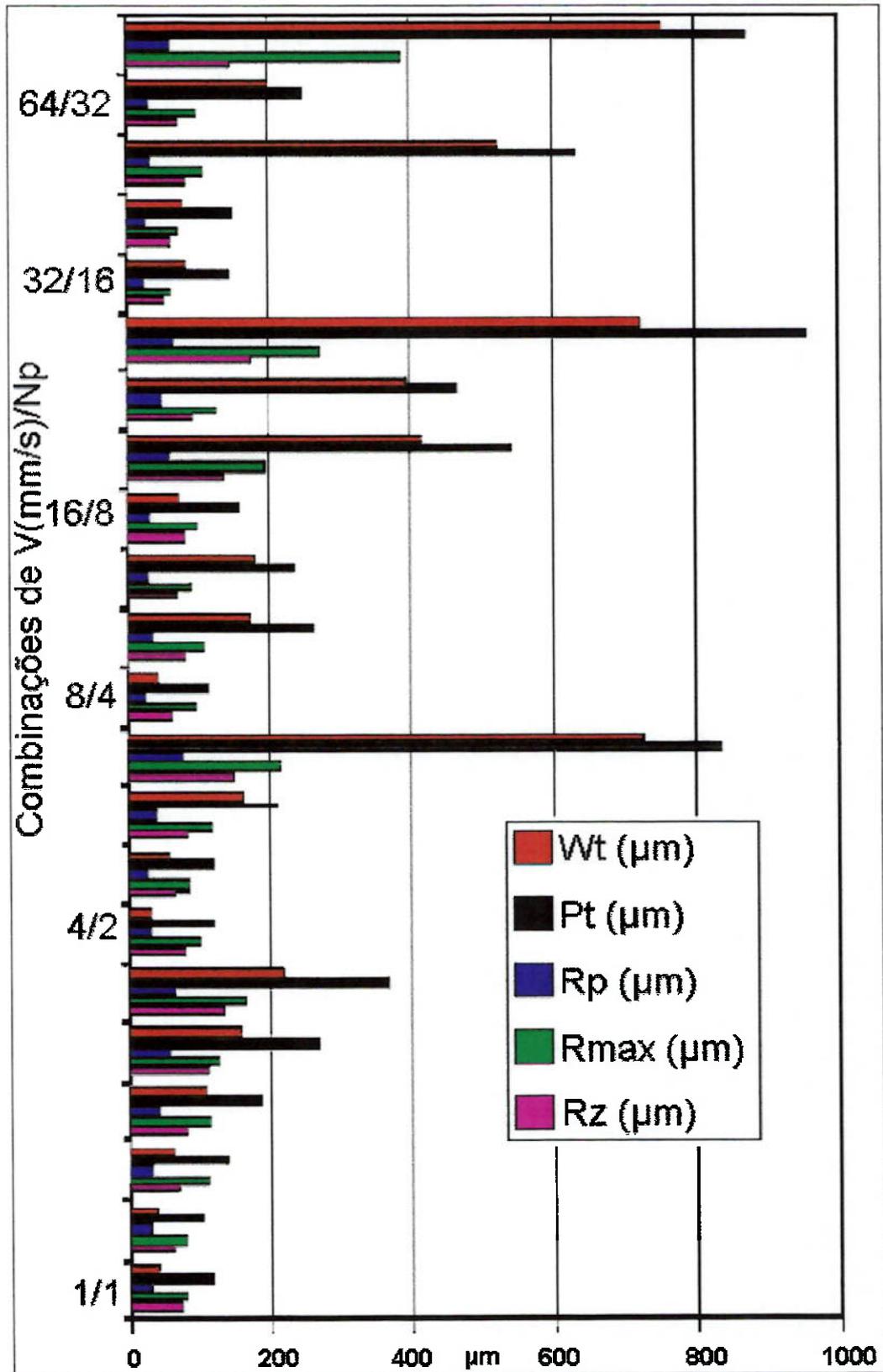


Fig. 76 Indicadores de rugosidade em Mármore branco Mantiqueira.

Na Fig. 76 a profundidade média da rugosidade ( $R_z$ ) apresenta resultados pouco variáveis em todas as combinações de  $V(\text{mm/s})/N_p$ . A profundidade máxima da rugosidade ( $R_{\text{max}}$ ) apresenta resultados ainda mais regulares para todas as combinações. O índice de rugosidade ou profundidade de nivelção ( $R_p$ ) apresenta aumentos pouco significativos conforme aumentam as combinações de  $V(\text{mm/s})/N_p$ . A profundidade do perfil ( $P_t$ ) e a profundidade da ondulação ( $W_t$ ) se comportam de modo semelhante, aumentando regularmente segundo o aumento das combinações de  $V(\text{mm/s})/N_p$ .

#### 4.5. Estudo do comportamento dos grãos minerais diante do jato abrasivo.

Conforme explicado no capítulo de Material e Métodos, as amostras destacadas dos corpos de prova para avaliação da Rugosimetria foram submetidas a digitalização das superfícies, geradas pelo jato abrasivo, com o intuito de observar o efeito da ação do jato nos diferentes grãos minerais. Nesta parte do trabalho, nas Fig. 41 até 51 algumas das imagens e das características observadas são apresentadas.

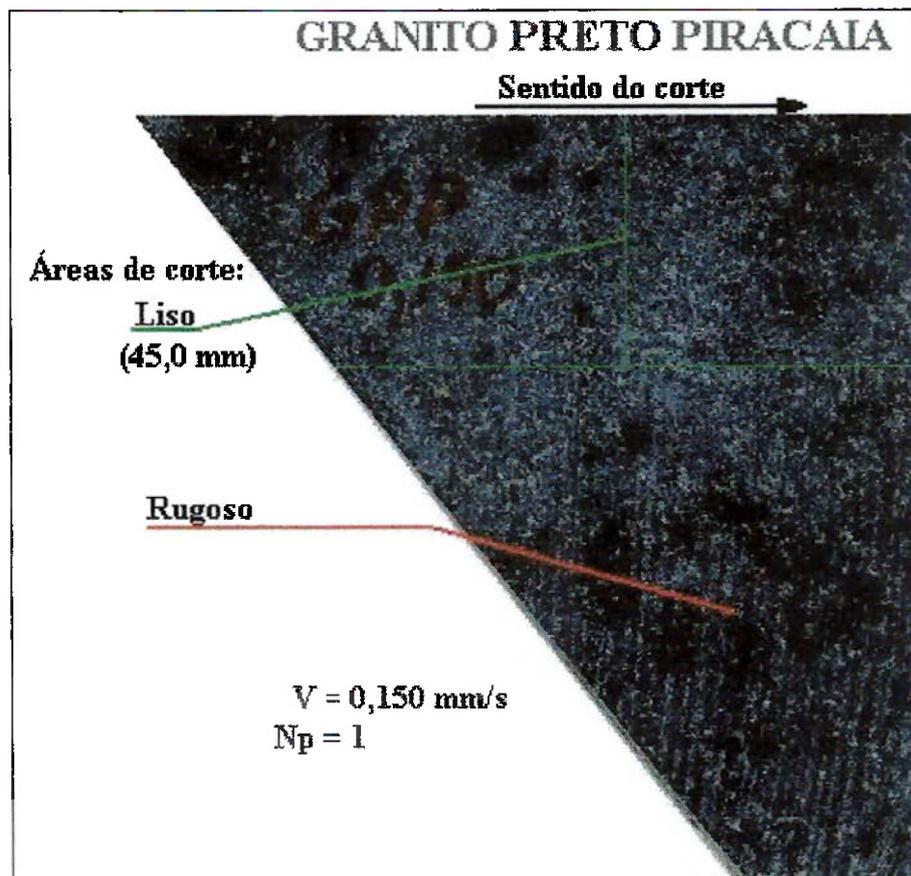


Fig. 77 GPP. Área gerada pelo jato abrasivo na combinação  $V/N_p$  mais lenta.

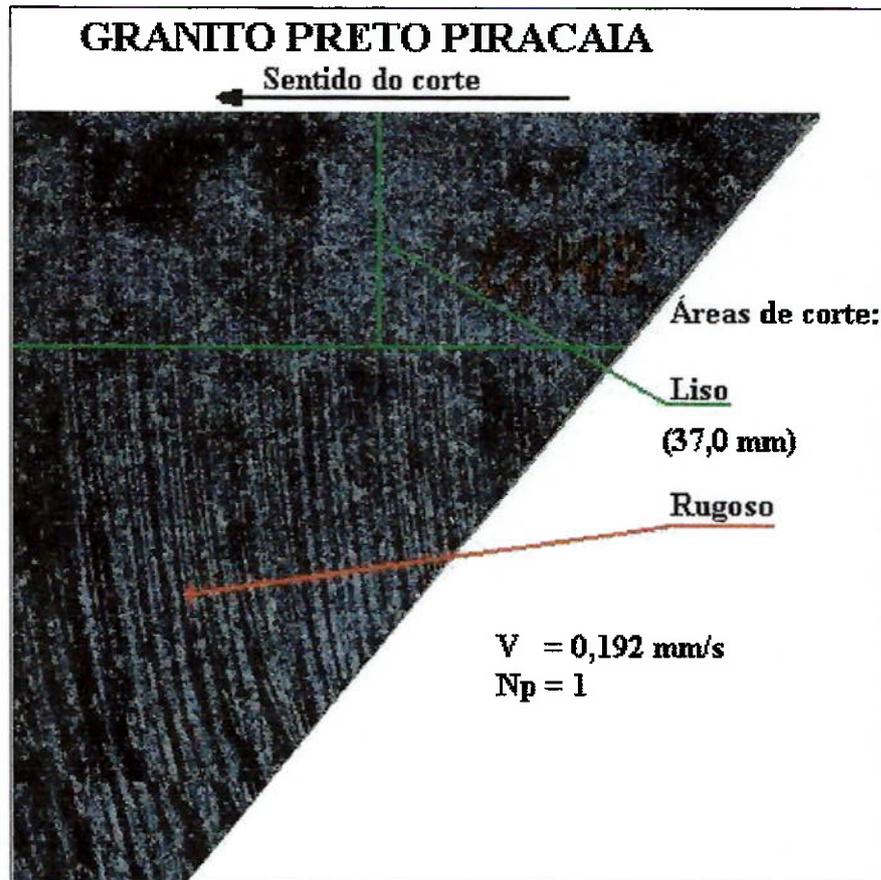


Fig. 78 GPP. Área gerada pelo jato abrasivo em combinação  $V/N_p$  ainda lenta.

Nas Fig. 77 e Fig. 78 os cortes foram efetuados por um único passo. No caso da Fig. 77 utilizou-se a qualidade de corte “etch” para poder selecionar a velocidade. Em ambos os casos, o programa “Make” da máquina foi consultado previamente simulando o corte na máxima qualidade (5). O programa propôs como velocidade de translação 0,192 mm/s. Decidiu-se aplicar primeiro a velocidade de 0,15 mm/s, menor que a proposta, e depois a do programa para comparar os resultados.

Da observação das duas imagens se obteve que:

- Há diferenças entre as duas superfícies quanto ao corte h liso e a rugosidade, mas ambas apresentam grande semelhança com as superfícies geradas com jato abrasivo em cortes de metais<sup>60, 63</sup>. Isto parece ter sido favorecido pela textura porfírica da rocha e o tamanho muito pequeno dos grãos minerais.
- Tanto nas fotos das Fig. 77 e 78 quanto na lupa binocular se observa cristalização homogênea, de textura porfírica, de grãos de cristais

pequenos e com distribuição equivalente de grãos félsicos e máficos o que da uma cor cinza escura a preta na rocha.

- No extremo da área de corte rugoso, apresentam-se sinais do efeito de erosão anormal. Estes sinais são mais evidentes na superfície cortada com a combinação  $V/Np = 0,192/1$ .
- O tamanho dos grãos minerais não permite diferenciar a resposta dos mesmos diante da ação do jato abrasivo. Aparentemente, todos os minerais presentes na rocha apresentam uma resposta semelhante.
- Estas observações também podem ser aplicadas às fotos da Fig. 79. Na esquerda, na superfície gerada pela combinação  $V/Np = 8 \text{ mm/s}$  e  $Np = 8$  se observam sinais de erosão no extremo do corte rugoso.



Fig. 79 Superfícies geradas pelo jato abrasivo em combinações distantes entre si.

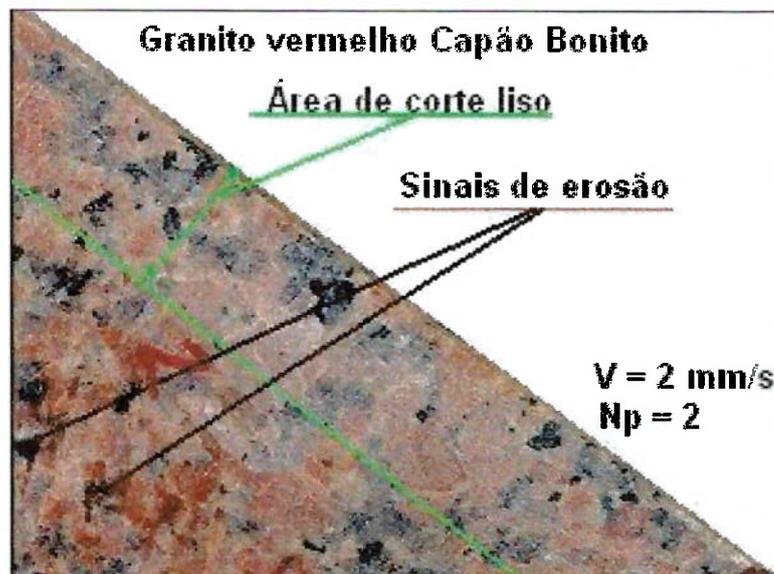


Fig. 80 Superfície gerada pelo jato abrasivo em GVCB (1)

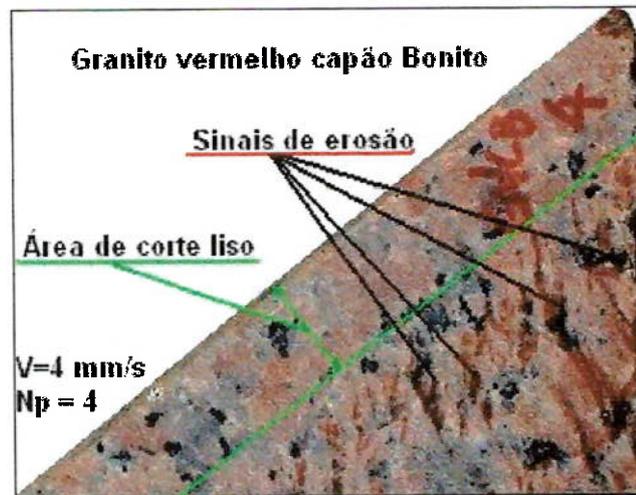


Fig. 81 Superfície gerada pelo jato abrasivo em GVCB (2)



Fig. 82 Superfície gerada pelo jato abrasivo em GVCB (3)

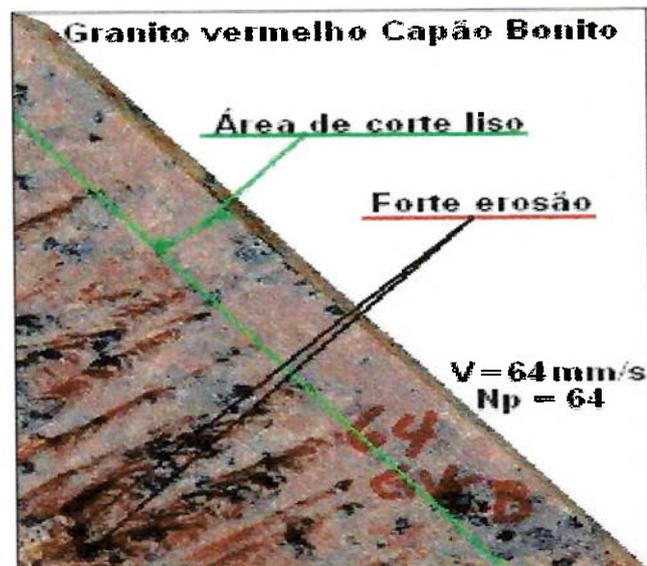


Fig. 83 Superfície gerada pelo jato abrasivo em GVCB (4)

As Fig. 80 até 83 apresentam várias superfícies geradas pela ação do jato d'água abrasivo de ultra-alta pressão. Das fotos é possível descrever o seguinte:

- Há diferenças entre as superfícies no que se refere ao h liso e a intensidade da rugosidade, há também semelhanças quanto à presença de sinais de erosão anormal.
- O granito vermelho Capão Bonito é rocha de granulação grossa, constituída principalmente por feldspato róseo, quartzo, biotita e magnetita, e de textura granular hipidiomórfica. Isto se observa na rocha à vista desarmada, na imagem digital ou sob a lupa binocular.
- Os exemplos apresentados mostram como dentro da área de corte liso, em que o jato abrasivo atua com toda sua energia cinética, todos os minerais são cortados da mesma forma, homoganeamente. Às vezes um diminuto cristal de quartzo apresenta uma fratura conchoidal. Por exemplo, 2 ou 3 casos são observados na combinação  $V/Np = 2/2$ . Observa-se que em alguns casos, no limite entre o quartzo e o feldspato, surge uma fina fratura que representa o início de uma ruga ou estria que se desenvolve na área de corte rugoso.
- Alguns cristais de biotita foram cortados paralelos ao seu hábito cristalino apresentando superfícies brilhantes, enquanto que outros foram cortados perpendicularmente ao hábito das folhas de micas podendo se ver as lâminas sob lupa binocular. Dentro da área de corte rugoso, há cristais de mica erodidos ou estourados.
- As rugas em geral cortam quartzo, feldspatos e micas e são regulares em sua expressão dentro da superfície gerada pelo corte do jato abrasivo. Mas, com o aumento da profundidade do corte é possível observar como alguns cristais parecem ter sido arrancados, pois a configuração interna da ruga ou estria muda de forma brusca e intensa, apresentando cavidades não coerentes com a superfície da ruga. Quase sempre é possível identificar o mineral assim afetado pelo jato por restar uma parte do cristal, seja de quartzo, feldspato ou mica.

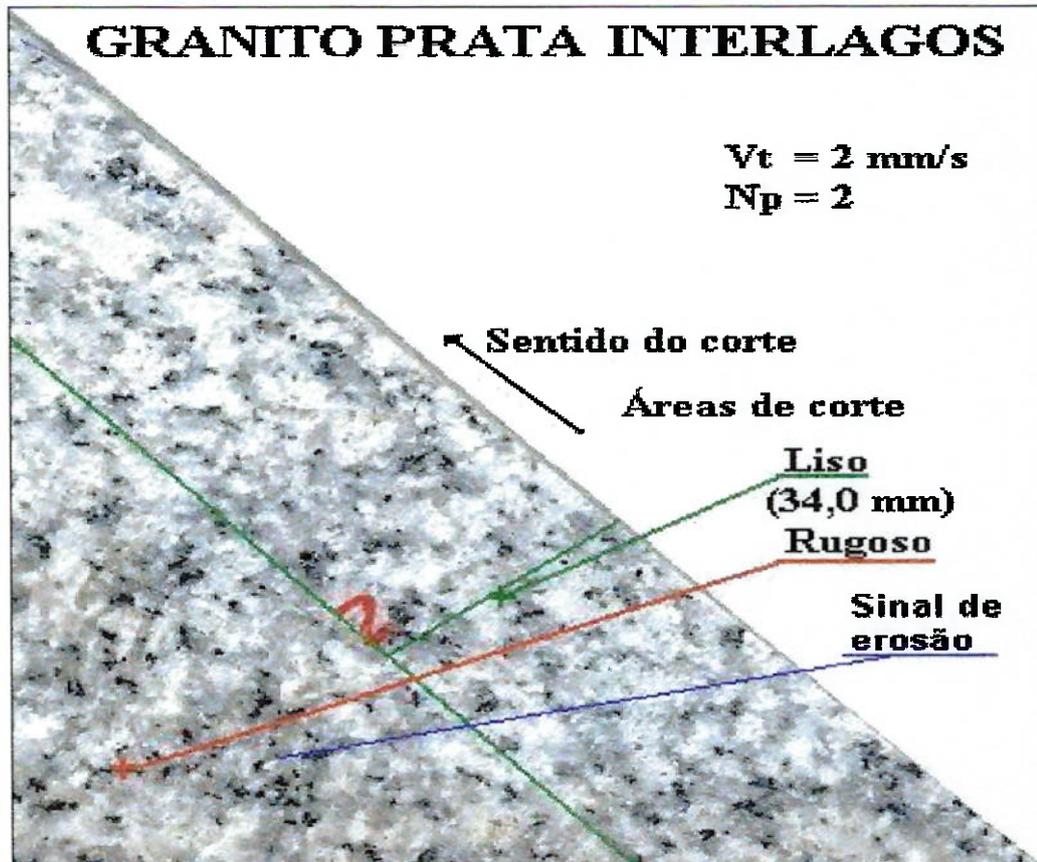


Fig. 84 Corte em Granito prata Interlagos

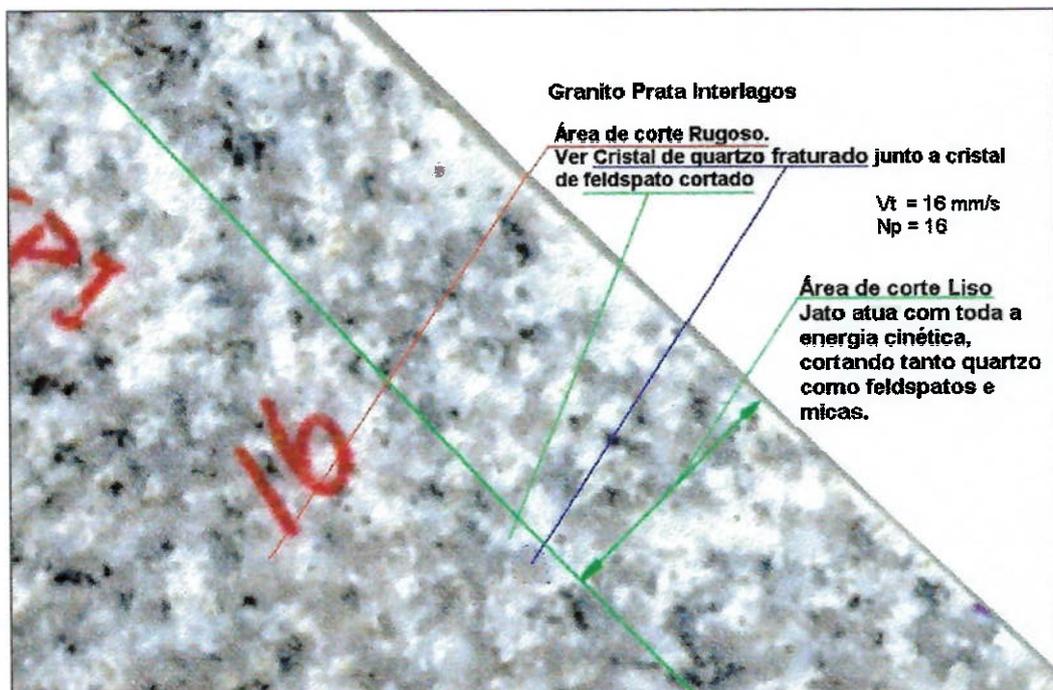


Fig. 85 GPI. Detalhamento de seção de superfície de corte em GPI.

Sobre as fotos das Fig. 84 e 85 de superfícies de cortes efetuados em Granito prata Interlagos, se esclarece que a segunda delas é ampliação de uma seção da superfície criada com a combinação V/Np 16/16, com objetivo de destacar a presença de um cristal de quartzo de fratura conchoidal junto a um outro de feldspato cortado sem defeitos. Além disso, é preciso dizer que:

- O Granito prata Interlagos, do mesmo modo que o granito anterior, apresenta granulação grossa, constituída principalmente por quartzo, feldspato e mica, de textura granular hipidiomórfica.
- O corte liso é homogêneo para todos os minerais constituintes. Na aresta de entrada do jato, algumas micas e quartzos apresentam pequenas cavidades.
- A formação de rugas na área de corte rugoso não apresenta preferências por um mineral ou outro. Após a ruga começar em um deles, esta se estende aos minerais abaixo sem distinção.
- Observou-se no corte com a combinação 4/4, uma extensa área erodida ondulada sob o corte liso e que a seguir retornou ao corte liso. O efeito de erosão anormal formou nesta parte intermediária uma cavidade alongada no sentido da translação do jato.
- Em quase todas as combinações é possível observar sinais de erosão. Os sinais de erosão são mais fortes nas combinações de V/Np 32/32 e 64/64.

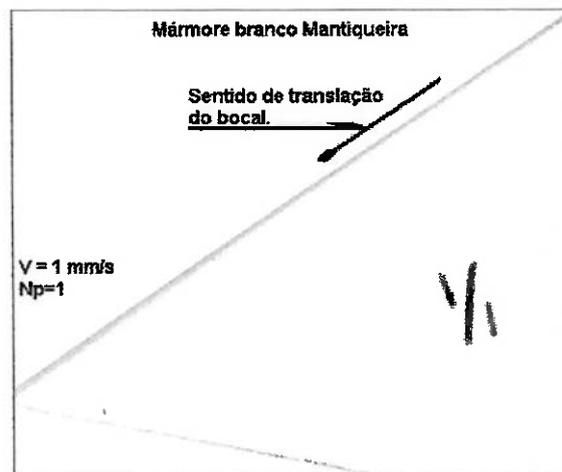


Fig. 86 Superfície criada no mármore pelo jato abrasivo na combinação mais lenta.

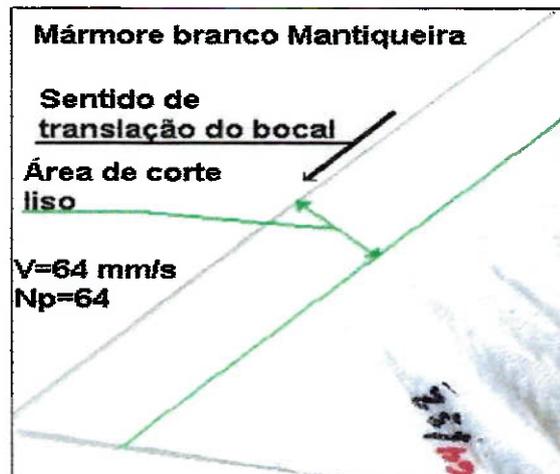


Fig. 87 Superfície criada no mármore pelo jato abrasivo na combinação mais rápida.

Nas Fig. 86 e 87, com as fotos das superfícies criadas pelo corte com jato d'água abrasivo de ultra-alta pressão, se percebe que:

- O Mármore branco Mantiqueira é rocha de cor branca, onde não é possível distinguir claramente, na foto impressa, o início do corte rugoso, sobretudo na combinação V/Np de 1/1, na qual é preciso utilizar o tato para poder detectar as rugas do corte.
- O Mármore branco Mantiqueira é também rocha mono-mineral que na combinação 1/1 apresenta superfície semelhante à criada no corte de Granito preto Piracaia e a observada ao cortar um metal<sup>63</sup> cujas dimensões dos grãos são similares.
- Já na combinação 4/2 apresenta sinais do efeito de erosão anormal dentro da área de corte rugoso, que também se apresentam nas combinações restantes. Estes sinais de erosão podem ser interpretados como o arranque de cristais dolomíticos mais duros ou resistentes, dentro da massa de calcita do mármore.
- Nas combinações 8/4, 16/8, 32/16 e 64/32 aparecem algumas cavidades arredondadas dentro da área de corte liso e também dentro da área de corte rugoso. As descritas dentro da área de corte liso foram percebidas com a ajuda do sentido do tato.

#### 4.6. Custos das operações de corte de rochas com o jato d'água abrasivo.

O custo das operações de corte efetuadas<sup>25, 35, 37</sup> se analisa sob as condições: Pressão de operação 290,0 MPa, diâmetro do orifício da jóia 0,356 mm, diâmetro do foco 0,725 mm, tipo de abrasivo granada 80 malhas, razão de fluxo de abrasivo 5,3 g/s, espessura máxima de corte 130,0 mm, comprimento do corte 0,20 m.

Tabela 36 Estimativa de custos das operações de corte.

ITEM	VALOR
1. Custo de aquisição do equipamento:	US\$ 120.000,00
2. Taxa Alfandegária, Imposto de importação e ICMS:	US\$ 85.440,00
Total:	US\$ 205.440,00
Amortização 10,000 horas. Custo horário	US\$ 20,54
Juros anuais 20%	US\$ 4,11
Custo horário da propriedade:	US\$ 24,65
Taxa cambial (1 US\$ = 2,95 R\$)	R\$ 72,72
3.- Custo de operação (por hora)	
3.1 Operador (Mão de obra):	R\$ 17,00
3.2 Custos do consumo de abrasivo:	R\$ 45,31
3.3 Jóia e tubo de mistura (substituição a cada 40 horas):	R\$ 24,01
3.4 Energia (R\$ 0.25/kwh):	R\$ 4,50
3.5 Manutenção da mesa:	R\$ 3,01
3.6 Substituição de componentes de alta pressão:	R\$ 11,13
3.7 Sistema de água destilada (240 L/h):	R\$ 4,80
3.8 Ar comprimido:	R\$ 2,35
Custo total de operação:	R\$ 112,11
4.- Custos totais de propriedade e de operação por hora ( $C_{top}$ ):	R\$ 184,83
Custo por minuto $C_{top}$ (R\$/min):	R\$ 3,08
Custo por segundo $C_{top}$ (R\$/s):	R\$ 0,051342

O cálculo do custo de corte por metro foi efetuado segundo a fórmula:

$$CC_{R\$/m} = [(TTC \times C_{top} (R\$/s))/200] 1000$$

Onde: TTC é o tempo de corte da linha em segundos,  $C_{top}$  Custos totais de propriedade e de operação por segundo. Os números representam o comprimento da linha e do metro. A fórmula determina o custo por metro de corte. Os resultados dos cálculos de custos por ensaio apresentam-se junto com os principais parâmetros de corte nas tabelas 17, 18, 19, 20 e nas Fig. 52, 53, 54, e 55 para melhor compreensão.

Tabela 37 Custos e parâmetros do corte em Granito preto Piracaia

Ensaio N°	V (mm/s)	Np	Abrasivo (kg)	TTC (s)	h liso (mm)	h total (mm)	Taxa de corte (mm <sup>2</sup> /s)	Custo da linha (R\$)	Custo do corte (R\$/m)
1	0,15	1	7,07	1.333,33	88,26	130	19,5	68,46	342,28
2	0,192	1	5,52	1.041,67	70,92	130	24,9	53,48	267,41
3	1	1	1,06	200,00	29,94	61,46	61,4	10,27	51,34
4	1	2	2,12	400,00	33,88	76,44	38,2	20,54	102,68
5	1	4	4,24	800,00	38,61	99,29	24,8	41,07	205,37
6	1	8	8,48	1.600,00	40,19	122,14	15,2	82,15	410,74
7	1	16	16,96	3.200,00	48,86	130	8,1	164,29	821,47
8	2	1	0,53	100,00	26	38,61	77,2	5,13	25,67
9	2	2	1,06	200,00	33,45	71,75	71,7	10,27	51,34
10	2	4	2,12	400,00	33,1	92,99	46,5	20,54	102,68
11	2	8	4,24	800,00	37,3	108,24	27,0	41,07	205,37
12	2	16	8,48	1.600,00	38,03	120,67	15,0	82,15	410,74
13	4	1	0,27	50,00	10,24	29,25	117,0	2,57	12,84
14	4	2	0,53	100,00	14,63	31,45	62,9	5,13	25,67
15	4	4	1,06	200,00	19,39	67,87	67,8	10,27	51,34
16	4	8	2,12	400,00	19,75	96,54	48,2	20,54	102,68
17	4	16	4,24	800,00	21,21	103,85	25,9	41,07	205,37
18	8	1	0,13	25,00	11,7	19,02	152,1	1,28	6,42
19	8	2	0,27	50,00	12,43	35,11	140,4	2,57	12,84
20	8	4	0,53	100,00	12,43	56,31	112,6	5,13	25,67
21	8	8	1,06	200,00	12,12	66,9	66,9	10,27	51,34
22	8	16	2,12	400,00	13,16	76,06	38,0	20,54	102,68
23	16	1	0,07	12,50	5,85	12,43	198,8	0,64	3,21
24	16	2	0,13	25,00	6,58	25,6	204,8	1,28	6,42
25	16	4	0,27	50,00	8,04	38,03	152,1	2,57	12,84
26	16	8	0,53	100,00	16,09	55,58	111,1	5,13	25,67
27	16	16	1,06	200,00	9,7	59,15	59,1	10,27	51,34
28	32	32	1,06	200,00	8,24	68,84	68,8	10,27	51,34
29	64	64	1,06	200,00	8,72	65,45	65,4	10,27	51,34

Tabela 38 Custos e parâmetros do corte em Granito vermelho Capão Bonito

Ensaio N°	V (mm/s)	Np	Abrasivo (kg)	TTC (s)	h liso (mm)	h total (mm)	Taxa de corte (mm <sup>2</sup> /s)	Custo da linha (R\$)	Custo do corte (R\$/m)
1	1	1	1,06	200,00	24,93	49,860	49,86	10,2	51,34
2	1	2	2,12	400,00	31,37	73,150	36,58	20,5	102,68
3	1	4	4,24	800,00	32,80	96,440	24,11	41,0	205,37
4	1	8	8,48	1.600,00	29,52	106,220	13,28	82,1	410,74
5	1	16	16,96	3.200,00	26,24	116,000	7,25	164,2	821,47
6	2	1	0,53	100,00	20,02	41,990	83,98	5,1	25,67
7	2	2	1,06	200,00	33,10	70,410	70,41	10,2	51,34
8	2	4	2,12	400,00	37,87	74,570	37,29	20,5	102,68
9	2	8	4,24	800,00	42,64	78,730	19,68	41,0	205,37
10	2	16	8,48	1.600,00	26,24	112,460	14,06	82,1	410,74
11	4	1	0,27	50,00	15,10	34,120	136,48	2,5	12,84
12	4	2	0,53	100,00	22,00	48,710	97,42	5,1	25,67
13	4	4	1,06	200,00	18,66	69,810	69,81	10,2	51,34
14	4	8	2,12	400,00	38,15	76,680	38,34	20,5	102,68
15	4	16	4,24	800,00	26,24	108,910	27,23	41,0	205,37
16	8	1	0,13	25,00	9,55	22,060	176,48	1,2	6,42
17	8	2	0,27	50,00	11,00	27,000	108,00	2,5	12,84
18	8	4	0,53	100,00	12,33	49,410	98,82	5,1	25,67
19	8	8	1,06	200,00	15,65	74,630	74,63	10,2	51,34
20	8	16	2,12	400,00	17,64	90,520	45,26	20,5	102,68
21	16	1	0,07	12,50	4,00	10,000	159,97	0,6	3,21
22	16	2	0,13	25,00	5,00	19,500	156,00	1,2	6,42
23	16	4	0,27	50,00	6,00	29,000	116,00	2,5	12,84
24	16	8	0,53	100,00	7,52	50,610	101,22	5,1	25,67
25	16	16	1,06	200,00	9,03	72,220	72,22	10,2	51,34
26	32	32	1,06	200,00	18,05	59,580	59,58	10,2	51,34
27	64	64	1,06	200,00		56,570	56,57	10,2	51,34

A taxa de corte, em mm<sup>2</sup>/s representa o material removido na linha de corte e é função da altura do corte, da velocidade do bocal, e do número de passos.

Tabela 39 Custos e parâmetros do corte em Granito prata Interlagos

Ensaio N°	V (mm/s)	Np	Abrasivo (kg)	TTC (s)	h liso (mm)	h total (mm)	Taxa de corte (mm <sup>2</sup> /s)	Custo da linha (R\$)	Custo do corte (R\$/m)
1	1	1	1,06	200,00	41,69	84,84	84,84	10,2	51,34
2	1	2	2,12	400,00	44,25	98,01	49,01	20,5	102,68
3	1	4	4,24	800,00	46,81	111,17	27,79	41,0	205,37
4	1	8	8,48	1.600,00	51,96	121,59	15,20	82,1	410,74
5	1	16	16,96	3.200,00	57,10	132,00	8,25	164,2	821,47
6	2	1	0,53	100,00	29,62	63,63	127,26	5,1	25,67
7	2	2	1,06	200,00	34,93	98,10	98,10	10,2	51,34
8	2	4	2,12	400,00	36,41	105,38	52,69	20,5	102,68
9	2	8	4,24	800,00	41,69	120,67	30,17	41,0	205,37
10	2	16	8,48	1.600,00	40,62	122,68	15,34	82,1	410,74
11	4	1	0,27	50,00	17,55	42,42	169,68	2,5	12,84
12	4	2	0,53	100,00	21,78	71,00	142,00	5,1	25,67
13	4	4	1,06	200,00	26,01	99,58	99,58	10,2	51,34
14	4	8	2,12	400,00	25,08	106,47	53,24	20,5	102,68
15	4	16	4,24	800,00	24,14	113,36	28,34	41,0	205,37
16	8	1	0,13	25,00	12,07	26,33	210,64	1,2	6,42
17	8	2	0,27	50,00	10,24	36,57	146,28	2,5	12,84
18	8	4	0,53	100,00	15,90	66,59	133,18	5,0	25,00
19	8	8	1,06	200,00	21,55	96,61	96,61	10,2	51,34
20	8	16	2,12	400,00	19,13	106,10	53,05	20,5	102,68
21	16	1	0,07	12,50	6,58	10,24	163,81	0,6	3,21
22	16	2	0,13	25,00	5,85	25,60	204,80	1,2	6,42
23	16	4	0,27	50,00	5,12	40,96	163,84	2,5	12,84
24	16	8	0,53	100,00	9,62	69,90	139,80	5,1	25,67
25	16	16	1,06	200,00	14,12	98,84	98,84	10,2	51,34
26	32	32	1,06	200,00	14,12	107,76	107,76	10,2	51,34
27	64	64	1,06	200,00	14,86	85,46	85,46	10,2	51,34

Tabela 40 Custos e parâmetros do corte em Mármore branco Mantiqueira.

Ensaio N°	V (mm/s)	Np	Abrasivo (kg)	TTC (s)	h liso (mm)	h total (mm)	Taxa de corte (mm <sup>2</sup> /s)	Custo da linha (R\$)	Custo do corte (R\$/m)
1	1	1	1,06	200,00	51,24	119,40	119,40	10,27	51,34
2	4	1	0,27	50,00	22,60	56,99	227,96	2,57	12,84
3	4	2	0,53	100,00	33,16	82,90	165,80	5,13	25,67
4	4	4	1,06	200,00	30,61	112,38	112,38	10,27	51,34
5	4	8	2,12	400,00	37,74	129,16	64,58	20,54	102,68
6	8	1	0,13	25,00	17,61	38,58	308,64	1,28	6,42
7	8	2	0,27	50,00	24,32	61,22	244,88	2,57	12,84
8	8	4	0,53	100,00	23,21	82,07	164,14	5,13	25,67
9	8	8	1,06	200,00	25,16	118,25	118,25	10,27	51,34
10	16	1	0,07	12,50	11,74	26,00	416,00	0,64	3,21
11	16	2	0,13	25,00	11,74	38,58	308,64	1,28	6,42
12	16	4	0,27	50,00	13,42	62,90	251,60	2,57	12,84
13	16	8	0,53	100,00	14,92	84,56	169,12	5,13	25,67
14	32	16	0,53	200,00	5,80	82,90	82,90	10,27	51,34
15	64	32	0,53	400,00	13,27	92,85	46,43	20,54	102,68

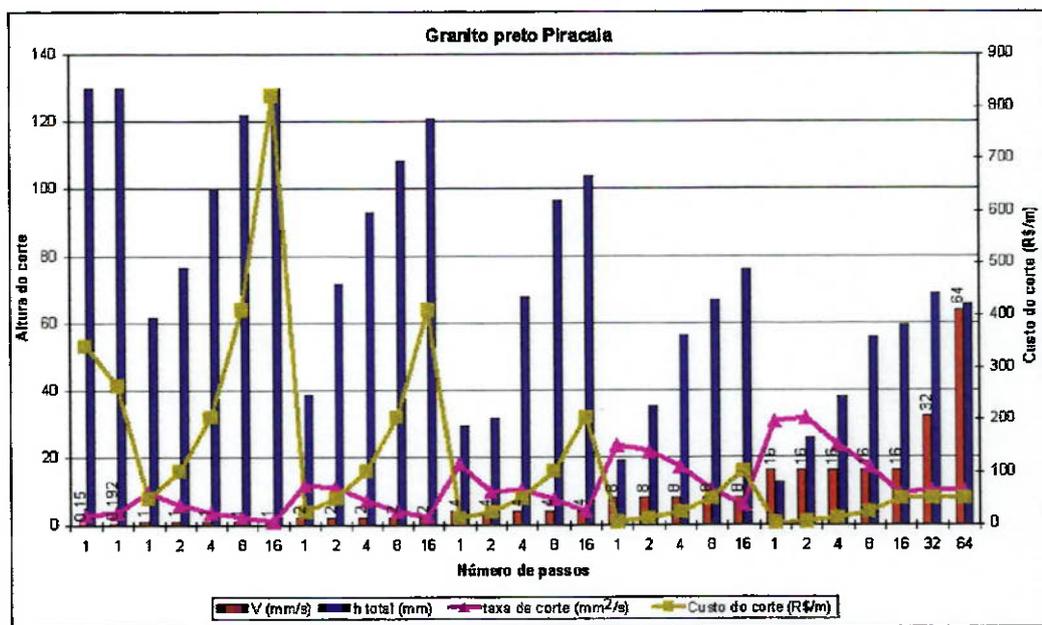
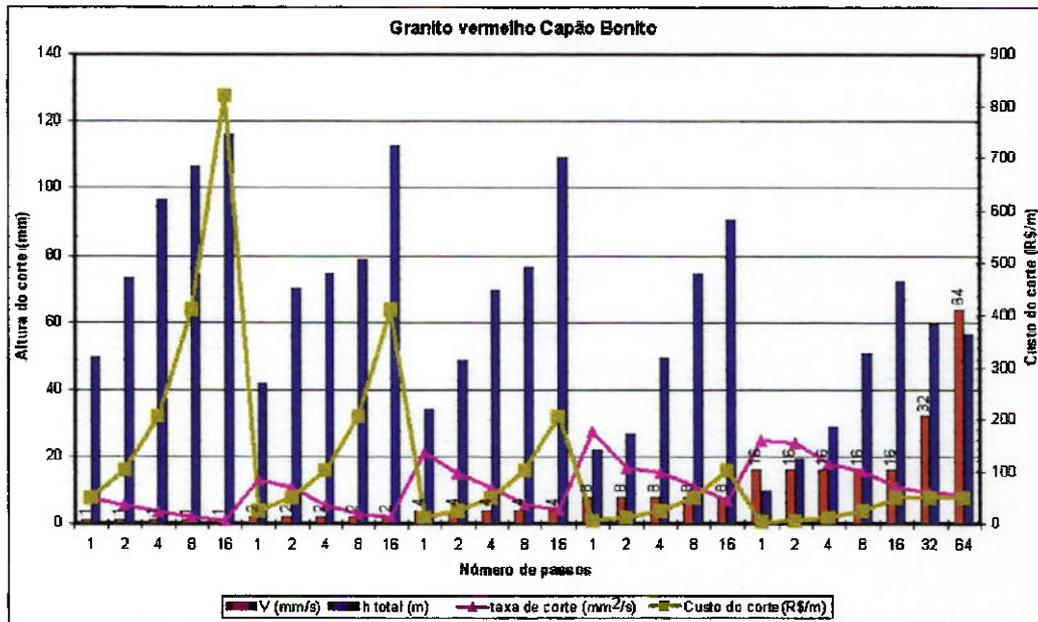


Fig. 88 Taxa de corte e custos relacionados aos parâmetros de corte em GPP.



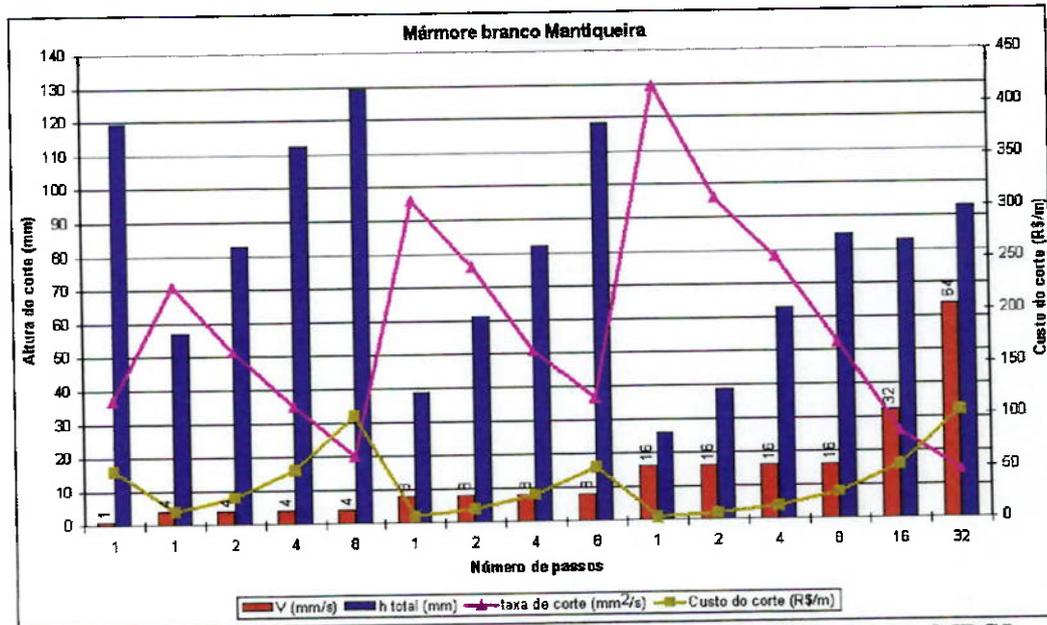


Fig. 91 Taxa de corte e custos relacionados aos parâmetros de corte em MBCJ.

Existe coincidência entre os gráficos dos três granitos enquanto à curva dos custos por metro, podendo se considerar esses gráficos padrões de orientação para aplicações futuras da tecnologia de corte por jato d'água em granitos. Como somente foi aplicado o ensaio de cortes a um mármore não é possível afirmar o mesmo para este tipo de rocha. Porém, a eficiência do equipamento e da técnica permite recomendar estes resultados como orientação para futuras aplicações da técnica ao corte de mármore.

Referente a taxa de corte (mm<sup>2</sup>/s), os resultados obtidos neste indicador, embora as curvas apresentem tendências similares, os valores medidos entre elas para os três granitos estudados apresentam algumas diferenças.

A natureza mineral do mármore diferente da dos granitos é expressa pela curva da taxa de corte (mm<sup>2</sup>/s). Entanto o mármore alcança taxas de 416,00 mm<sup>2</sup>/s, os granitos não passam de 210,64 mm<sup>2</sup>/s. Entanto que a taxa de corte mínima do mármore é de 64,58 mm<sup>2</sup>/s, a dos granitos fica na ordem de 7,25 mm<sup>2</sup>/s para GVCB, 8,13 mm<sup>2</sup>/s para o GPP e de 8,25 mm<sup>2</sup>/s para GPI, evidenciando a maior resistência à remoção do material pelos granitos.

## 5.— CONCLUSÕES

De maneira geral podem ser apresentadas as seguintes conclusões:

- Têm sido aplicados e estudados os principais indicadores e parâmetros técnicos e tecnológicos, relacionados com o corte de rochas e a técnica de jato d'água abrasivo de ultra-alta pressão tais como: velocidade, número de passos do bocal, consumo específico de abrasivo, profundidade de corte, qualidade e custos do corte.

- O trabalho da presente pesquisa, junto com os diferentes artigos apresentados em eventos científicos de caráter internacional e publicados em anais ou em revistas técnico-científicas indexadas, têm contribuído a desenvolver um método de corte de rochas não - convencional, pouco conhecido no Brasil e nos países em desenvolvimento.

Os objetivos estabelecidos para o presente trabalho foram cumpridos conforme é mostrado abaixo:

1. Foi aplicada a técnica de jato d'água abrasivo de ultra-alta pressão ao corte de rochas brasileiras.
2. Foi aplicado o método de corte por múltiplos passos da ferramenta de corte em quatro tipos petrográficos de rochas brasileiras: granito preto Piracaia, granito vermelho Capão Bonito, granito prata Interlagos e mármore branco Mantiqueira, e os corpos de prova utilizados cumpriram os requisitos estabelecidos nos objetivos deste trabalho. Da análise da aplicação deste método resulta que:
  - a) O aumento do número de passos do bocal resulta no aumento da altura do corte (liso e total), porém com o aumento da velocidade de translação do bocal o efeito é o oposto.
  - b) O aumento do número de passos está diretamente relacionado com o aumento do consumo específico de abrasivo. Aqui também o aumento da velocidade produz um efeito contrário, diminui o consumo específico de abrasivo e resulta em menor altura de corte.
  - c) Nos granitos as maiores alturas de corte total foram atingidas nas combinações de velocidades de translação combinadas com 16 passos do bocal. No caso do mármore foi com 8 passos do bocal.
  - d) Os gráficos, que são o produto da análise da aplicação do método de

múltiplos passos, apresentados no capítulo Resultados e Interpretação, podem ser utilizados para selecionar as melhores combinações a aplicar em trabalhos futuros de corte de rochas com espessuras determinadas.

3. Foi aplicada a “Rugosimetria”, avançada técnica de medição dos parâmetros da textura de superfície, para avaliar quantitativamente a qualidade dos cortes realizados. A análise dos seus resultados oferece as conclusões mostradas abaixo:
  - a) Os parâmetros medidos foram: Ra (desvio médio aritmético da rugosidade média), Rz (profundidade média da rugosidade), Rmax (profundidade máxima de rugosidade), Rk (Profundidade da rugosidade na área central do perfil), Rp (profundidade de nivelção também conhecido como índice de rugosidade), Pt (profundidade do perfil) e Wt (profundidade da ondulação).
  - b) Nas rochas testadas os melhores resultados de qualidade correspondem aos parâmetros resultantes das combinações com menor velocidade de translação e um só passo do bocal.
  - c) A diferença de qualidade está associada à altura do corte resultante o que indica que a rugosidade aumenta segundo o jato d’água abrasivo perde coesão e se alarga. Isto implica que para melhorar os indicadores de qualidade é preciso manter o diâmetro do jato por mais distância, seja aumentando a energia, seja mediante aditivos ou ambos.
4. Foi verificado o comportamento do afunilamento na aplicação do método de corte por passos múltiplos da ferramenta de corte em corpos de espessuras maiores de 69 mm e menores de 140 mm.
  - a) A largura do sulco, a entrada e à saída do jato, resultam similares no caso de rochas de textura porfírica de grão pequeno ou em rochas de composição mono-mineral.
  - b) A largura do sulco no caso dos granitos de textura granular grossa apresenta um comportamento diferente do caso anterior. Entanto a largura do sulco na entrada do jato é similar em toda a extensão do corte, já na saída do jato o sulco apresenta larguras irregulares e diferentes, do principio do corte até o final.
  - c) Nas rochas testadas, o afunilamento produzido pelo método de cortes por

passos múltiplos do bocal, apresenta comportamentos diferentes para cada combinação de velocidade do bocal com o número de passos. Às vezes é convergente, às vezes é divergente, e ainda em alguns casos não parece ter afunilamento nenhum.

5. Foi estudado o efeito do jato abrasivo no corte dos diferentes tipos petrográficos – mineralógicos. Em cada rocha foi avaliado e descrito o comportamento dos grãos minerais diante do jato d'água abrasivo de ultra-alta pressão nas diferentes profundidades do corte.
  - a) Em geral as rochas de textura porfírica e grãos pequenos favorecem o corte com o jato. O mesmo acontece no caso do mármore que é rocha mono-mineral.
  - b) Dos três granitos, o vermelho Capão Bonito possui o maior módulo de deformabilidade estático, e por regra geral é a rocha onde o jato obteve as menores alturas de corte liso e total. Ou seja, é o granito mais resistente a ação do jato d'água abrasivo.
  - c) Os minerais duros como o quartzo, parecem facilitar o corte no início, mas depois contribui a maior rugosidade por fraturar-se conchoidalmente.
  - d) No corte de rochas, o jato d'água abrasivo de ultra-alta pressão aproveita o hábito cristalino dos minerais. Isto resulta evidente quando corta micas em direção paralela às folhas.
  - e) As fraturas internas das rochas são acrescentadas pelo jato passando a rugas segundo aumenta a altura do corte.
6. Foram avaliados, os custos dos ensaios de corte efetuados com jato abrasivo nas rochas submetidas aos ensaios.
  - a) Foi determinado o custo por metro de corte (R\$/m) segundo a espessura da rocha. O mesmo aumenta segundo aumenta o número de passos do bocal.
  - f) A taxa de remoção de material em  $\text{mm}^2/\text{s}$  diminui segundo aumenta o número de passos do bocal, o que explica o ponto anterior.

**LISTA DE REFERÊNCIAS**

1. HENNIES, W.T. **Rock Excavation: a critical review.** In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MINE PLANNING AND EQUIPMENT SELECTION 5. São Paulo. 1996. Proceedings. A. A. Rotterdam, Balkema, 1996. P.419-24.
2. LAUAND, C. T. **Contribuição ao estudo do corte de rochas por jato d'água abrasivo.** 2001. 124p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica - Universidade de São Paulo. São Paulo.
3. MARTÍN CORTÉS, G. R.; ANADÃO, P.; LIMA, V. A. C.; WIEBECK, H.; VALENZUELA DÍAZ, F. R.; HENNIES, W. T.; LAUAND, C. T. **Corte de corpos de prova de materiais poliméricos com jato d'água de ultra-alta pressão.** In: VIII SIMPOSIO LATINOAMERICANO DE POLÍMEROS, VI CONGRESO IBEROAMERICANO DE POLÍMEROS, II SIMPOSIO IBEROAMERICANO DE QUITINA, XV CONGRESO NACIONAL DE POLÍMEROS. Acapulco, Novembro 2002. Libro de Resúmenes: Sociedad Polimérica de México A. C., 2002. p.546 – 547.
4. ULRICH, Robert **Waterjet vs. Laser.** 1998. Artigo sobre características da técnica de jato d'água abrasivo de ultra-alta pressão e comparação com outras técnicas. Presidente de LAI Companies. Disponível em: <http://www.wjta.org>. Acesso em outubro de 1998.
5. CAVALCANTI, A.M.S. **Tecnologia da pedra.** São Paulo. Pongetti. 1951. Pp 13 e 169 – 252.
6. STELLIN Jr., A. **Serragens de granitos para fins ornamentais.** 1998. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas. ISSN 0104-0553. BT/PMI/085. São Paulo.
7. VIDAL, F.W.H. **Estudo dos elementos abrasivos de fios diamantados para a lavra de granitos do Ceará.** 1999. 165p. Tese (Doutorado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.
8. HENNIES, W. T.; STELLIN JUNIOR, 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., Dniepropetrovsk, 1999. Proceedings. MINE PLANNING AND EQUIPMENT SELECTION, Dniepropetrovsk, National Mining University of Ukraine NMUU Ukraine. 1999. p.21-26.
9. KITZINGER, F.; NANTEL, J. H.; HAMELIN, M. **Progress in plasma blasting**. CADDET Newsletter, p. 18-20, nov. 1992. Special issue.
  10. NANTEL, J. H.; KITZINGER, F. Plasma blasting techniques. CADDET Newsletter, p. 79-82, nov. 1992. Special issue.
  11. NANTEL, J.; KITZINGER, F. **Environmental impact of electric blasting**. CADDET Newsletter, p. 75-7, nov. 1992. Special issue.
  12. STELLIN JUNIOR, A.; HENNIES, W. T.; SILVA, C. M. M.; COSTA, E. G. **The electro-hydraulic principle as blasting alternative in urban areas**. In: WORLD MINING CONGRESS, 17. / CONVENCION NACIONAL DE MINERIA, 22., Acapulco, 1997. TECHNICAL PAPERS. Acapulco, Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, 1997. p.49 – 56.
  13. LAUAND C.T., MARTIN CORTES G. R., SILVA L.A.A., HENNIES W.T., CICCUCI R. **The Brazilian Program of High Pressure Water Jet to Cut Ornamental Rocks**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL ISSUES AND WASTE MANAGEMENT IN ENERGY AND MINERAL PRODUCTION – SWEMP 6th. Calgary. Canada May-Jun 2000. Proceedings. SIXTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL ISSUES AND WASTE MANAGEMENT IN ENERGY AND MINERAL PRODUCTION. Rotterdam A. A. BALKEMA. 2000. p. 711 – 716.
  14. SOARES, L.; FUJIMURA, F.; HENNIES, W.T.; BRAGA J.M. **Continuous mining of sand at São Paulo, Brazil**. 1998. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CONTINUOUS SURFACE MINING 5. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. p.303-311. Wrocław. Poland.
  15. SAVANICK, R.C. Hydraulic mining. In: LABUS T. J. **Fluid jet technology: fundamentals and application** 4th.ed. Saint Louis, Water Jet Technology Association. 1999. Section 6.0 p. 6.1-6.12.

16. HENNIES, W. T.; MARTIN CORTES, G. R.; LAUAND, C. T. Capítulo 7 **Aplicações no corte de rochas e na cominuição**. In: HENNIES, W. T.; MARTIN CORTES, G. R.; LAUAND, C. T. CURSO DE ATUALIZAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL. Aplicações de Jato d'água na Engenharia. PECE-EPUSP, 2002. p.93 – 99.
17. CICCUCI, R.; BORTOLUSSI, A. 1998 **Waterjet in dimensional stone quarrying**. In: Momber, A. (ed.) Water Jet Application in Construction Engineering. A. A. Balkema, Rotterdam. p.289 – 305.
18. HLAVAC, L. M.; SITEK, L. **Rock quarrying and related mining applications of liquid jets**. In: Momber, A. (ed.) Water Jet Application in Construction Engineering. A. A. Balkema, Rotterdam. p.277 – 288.
19. SAVANICK, G.A. **Borehole Mining of Phosphate Ore**. Article in Bureau of Mines Research 80. Bureau of Mines Special Publication 1 - 81, p.40. 1980.
20. SAVANICK, G.A. **Borehole Mining of Deep Phosphate Ore in St. Johns County, Florida**. In: Mining Engineering. Vol.37. No. 2 p.144. February 1985.
21. WATERJET-TECH, INC COMPANY. Auburn, WA. Apresenta o histórico do desenvolvimento dos equipamentos de jato d'água abrasivos de ultra-alta pressão. Disponível em: <<http://www.waterjet-tech.com/index.html>> **History**. In Home Page Waterjet-Tech, Inc Company. Acesso em janeiro de 2002.
22. KODAK Home Page. Estados Unidos. Apresenta relação de produtos óticos de elevada qualidade preparados por jato d'água abrasivo. Disponível em <http://wwwes.kodak.com/US/en/government/ias/optics/index.shtml> Acesso em: Fevereiro 2002.
23. MOMBER, A.W.; KOVACEVIC, R. **Principles of Abrasive Water Jet Machining**. WOMA Apparetebau GmbH, Duisburg, Germany. Suthern Methodist University, Dallas, USA. ISBN 3540762396. Springer – Verlag London Ltd. 1998. 394p
24. SUMMERS D.A. **A historical perspective on Waterjet development**. Section 1.0 pp.1.5. In: “An overview of waterjet. Fundamentals and

- Applications” 2001. Published by The Waterjet Technology Association. St. Louis, MO. USA.
25. AGUS, M.; BORTOLUSSI, A.; CAREDDU, N.; CICCUCI, R.; GROSSO, B.; MARRAS, G. **Multi-pass abrasive water jet cutting strategy**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 16th. Aix-en-Provence. Outubro, 2002. PAPERS: BHR Group Limited – Editor: Paul Lake, United Kingdom, 2002. p. 243 – 257.
  26. MOMBER, A. W. **Water Jet application in Construction Engineering**. A. A. BALKEMA, Rotterdam, 1998. p.416
  27. LAUAND C.T.; MARTIN CORTES G.R.; HENNIES W.T. **Rock technological parameters useful to water jet cutting systems**. In: International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection 9th. – PROCEEDING. MPES – 2000 Rotterdam, Balkema, 2000 pp 625 – 630. Athens. Greece. 6 – 9 November 2000.
  28. KOVACEVIC R.; HASHISH M.; MOHAN R.; RAMULU.; KIM T.J.; GESKIN E.S. 1997 **State of the art of research and development in abrasive waterjet machining**. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME. v 119 n 4(B) Nov 1997, p 776-785.
  29. MARTIN CORTES, G.R.; LAUAND, C.T.; HENNIES, W.T.; CICCUCI, R. **Abrasives in water jet cutting systems**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MINE PLANNING AND EQUIPMENT SELECTION, 9., Atenas, 2000. PROCEEDINGS. NINTH SYMPOSIUM ON MINE PLANNING AND EQUIPMENT SELECTION, A. A. Balkema, Rotterdam, 2000. p. 641- 645.
  30. HENNIES, W. T.; SOARES, L.; FUJIMURA, F.; LAUAND, C. T.; MARTÍN CORTÉS, G. R. **Water jet applications in mining and others fields**. In: MINE PLANNING AND EQUIPMENT SELECTION, 10TH. New Delhi, 2001. PROCEEDINGS: Tenth International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection. Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd. New Delhi – Calcutta, 2001. p.209 – 214.
  31. LAUAND,C. T.; MARTÍN CORTES,G. R.; HENNIES, W. T.; AGUS, M. **Performance of water jet cutting system in dimension stone**. In:

- INTERNATIONAL CONFERENCE IN WATERJETTING, 9th. St. Louis, 2001. PROCEEDING: 9TH. International Conference in Waterjetting, St. Louis, 2001. p.243 – 265.
32. HENNIES, W.T.; VALENZUELA DIAZ, F.; LAUAND, C.T.; MARTIN CORTES, G.R. **Garnets for Ultra High Pressure Water Jets. Technological Characteristics.** In: THIRD INTERNATIONAL LATIN-AMERICAN CONFERENCE ON POWDER TECHNOLOGY Florianópolis, November 2001. Proceeding: PTECH – 2001, Associação Brasileira de Cerâmica, Florianópolis, 2001. 1 CD – Rom.
33. HENNIES, W.T.; JOSÉ, C. L. V.; VALENZUELA DIAZ, F.; BÜCHLER, P. M.; LAUAND, C.T.; MARTIN CORTES, G.R. **Technological characteristics of garnets for ultra high pressure water jets.** Materials Science Forum. Vols. 416 – 418 (2003) pp.41 – 46. © 2003 Trans Tech Publications, Switzerland. Apresentado em: Third International Latin-American Conference On Powder Technology Florianópolis, November 2001.
34. LAUAND, C. T.; MARTIN CORTES, G. R.; HENNIES, W. T.. **Jato d'água abrasivo para corte de ladrilhos cerâmicos.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 46th. São Paulo, 2002. Anais: 46th. Congresso Brasileiro de Cerâmica. 2002. 1 CD-Rom.
35. HENNIES, W. T.; LAUAND, C. T.; MARTIN CORTES, G. R. **Jato d'água abrasivo para corte e gravação de materiais friáveis.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo. São Paulo, 2002. BT/PMI/157. Escola Politécnica da USP, 2002. Pp.18.
36. MARTÍN CORTÉS, G. R.; ANADÃO, P.; LIMA, V. A. C.; WIEBECK, H.; VALENZUELA DÍAZ, F. R.; HENNIES, W. T.; LAUAND, C. T. **Corte de corpos de prova de materiais poliméricos com jato d'água de ultra-alta pressão.** (Pôster) In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Natal, 2002. Anais: CIBECIMAT – 2002, Natal, 2002. Resumo.
37. HENNIES, W. T.; LAUAND, C. T.; MARTÍN CORTÉS, G. R. **Advanced waterjet technology application in complex design with friable materials.**

- In: ENVIRONMENTAL ISSUES AND WASTE MANAGEMENT IN ENERGY AND MINERAL PRODUCTION, 7th. Cagliari, October 7 –10, 2002. PROCEEDINGS: SWEMP – 2002, Edited by: Raimondo Ciccu, DIGITA, Department of Geoinengineering and Environmental Technologies, University of Cagliari, Italy. 2002. p.537 – 548.
38. HENNIES, W. T.; LAUAND, C. T.; MARTÍN CORTÉS, G. R.; BOSCHESI MAZUQUI, L. M. **Soil sample preparation with water jet for geotechnical assays.** In: ENVIRONMENTAL ISSUES AND WASTE MANAGEMENT IN ENERGY AND MINERAL PRODUCTION, 7th. Cagliari, October 7 –10, 2002. PROCEEDINGS: SWEMP – 2002, Edited by: Raimondo Ciccu, DIGITA, Department of Geoinengineering and Environmental Technologies, University of Cagliari, Italy. 2002. p.549 – 552.
39. LAUAND, C. T.; MARTÍN CORTÉS, G. R.; HENNIES, W. T. Water jet researches at University of São Paulo. **Part 1 – Water jet cut process optimisation: an advanced method of experimentation.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 16th. Aix-en-Provence, outubro 2002. PAPERS: BHR Group Limited – Editor: Paul Lake, United Kingdom, 2002. p. 451 – 456.
40. LAUAND, C. T.; MARTÍN CORTÉS, G. R.; HENNIES, W. T.; BOSCHESI MAZUQUI, L. M.; PARAGUASSU, A. B. **Water jet researches at University of São Paulo. Part 2 – New method of soil sample preparation with plain water jet.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JETTING, 16th. Aix-en-Provence. Outubro, 2002. PAPERS: BHR Group Limited – Editor: Paul Lake, United Kingdom, 2002. p. 457 – 461.
41. MARTÍN CORTÉS, G. R.; HENNIES, W.T.; LAUAND C. T. **Dimensional stone cutting with water jet: Surface Finishing.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MINE PLANNING AND EQUIPMENT SELECTION, 11th. Bouzov – Ostrava, setembro 2002. Proceeding: Eleventh International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection. Bouzov, Czech Republic, setembro 2002. p.43 – 48.
42. BORTOLUSSI, A.; MANCA, M. G.; CAREDDU, N.; CICCUCU, R.; OLLA, S. **Surface finishing of marble with abrasive waterjet.** In: International

- Conference on WATER JETTING, 16th. Aix-en-Provence, outubro, 2002. PAPERS: BHR Group Limited – Editor: Paul Lake, United Kingdom, 2002. p.425 – 436.
43. CARRINO, L.; POLINI, W.; TURCHETTA, S.; MONNO, M. **Surface processing of natural stones through A. W. J.** In: International Conference on WATER JETTING, 16th. Aix-en-Provence, outubro, 2002. PAPERS: BHR Group Limited – Editor: Paul Lake, United Kingdom, 2002. p.437 – 450.
44. HENNIES, W. T.; LAUAND, C. T.; MARTÍN CORTÉS, G. R.; VALENZUELA DIAZ, F. R. **Otimização do corte de polímeros com jato abrasivo.** In: Congresso Brasileiro de Polímeros, nov. 2003. Não publicado.
45. MARTÍN CORTÉS, G. R.; SANTOS, R. B.; HENNIES, W. T.; VALENZUELA DIAZ, F. R.; VALENZUELA DIAZ, F. R. **Recuperação de granada utilizada em jato d'água abrasivo de ultra-alta pressão.** In: Fórum das Universidades Paulistas, 18 – 20 maio, São Pedro, SP. Não publicado.
46. CARUSO, L.G.; BRAGA, T.O. et al. **Catálogo das Rochas Ornamentais do Estado de São Paulo.** 1990 IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológica Secretaria da Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento Econômico – SCTDE – PRÓ-MINÉRIO. Governo do Estado de São Paulo. São Paulo. 122 pp.
47. FRASCÁ, M.E.B.O.; MELLO, I.S.C.; QUITETE, E.B. **Rochas Ornamentais do Estado de São Paulo.** IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. E-mail: digeo@ipt.br .Maio de 2000. Em CD-Rom.
48. BORN, H.; SOARES, L.; BRAGA, J. M. S. **Caracterização tecnológica dos materiais de construção de jazida localizada em área urbana, São Paulo – SP.** In: CONGRESSO ÍTALO – BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MINAS, 4.,Canela, RS. 1996. **Anais.** EGATEA – Revista da Escola de Engenharia da UFRGS. 1996. p.323 – 331.
49. HENNIES, W. T.; STELLIN Jr., A.; CRETLEI, C. **Jet piercing application for red granite block mining in São Paulo, Brazil.** In: Mine Planning and Equipment Selection, 8, 1999 & Mine Environmental and

- Economical Issues, Dnepropetrovsk, 1999. **Proceedings: Mine Planning and Equipment Selection & Mine Environmental and Economical Issues.** National Mining University of Ukraine. Dnepropetrovsk 1999.
50. OMAX Corporation. **The Omax Jetmachining System. User's Guide.** Auburn, Wa. 1998.
51. ZENG J., KIM T. J., WALLACE R. J. **Quantitative evaluation of machinability in abrasive waterjet machining.** In: PED – Vol. 58, Precision Machining: Product Engineering Division. ASME 1992.
52. STELLIN, A. J.; OKAGAWA, H.; FILHO, J. V. N.; HENNIES, W. T. **Glossário de termos técnicos de mineração. Setor Lavra de minas.** 1987. Nº 1. Cadernos Técnicos. APEMI – Associação Paulista de Engenheiros de Minas. Patrocínio: Programa de Desenvolvimento de Recursos Minerais.
53. MOMBER, A.W.; KOVACEVIC, R. **Principles of Abrasive Water Jet Machining.** WOMA Apparetebau GmbH, PO BOX 141820, D-47208 Duisburg, Germany. Suthern Methodist University, PO BOX 750337, Dallas, TX 75275, USA. ISBN 3540762396. Springer – Verlag London Ltd. 1998. 394p.
54. MARTIN CORTES, G.R. **Caracterização tecnológica de abrasivos.** In: HENNIES, W. T.; FUJIMURA, F. **PMI – 5810 Corte não convencional de materiais.** São Paulo: PMI – EPUSP, 2000. p. 133 – 138.
55. MARTIN CORTES, G.R.; LAUAND, C.T.; HENNIES, W.T.; CICCUCI, R. **Abrasives in water jet cutting systems.** In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MINE PLANNING AND EQUIPMENT SELECTION, 9., Atenas, 2000. Proceedings. Rotterdam, Balkema, 2000. p. 641- 645.
56. LAUAND, C. T. Seminário: **Determinação do fluxo de massa de abrasivos.** In: HENNIES, W. T.; FUJIMURA, F. **PMI – 5810 Corte não convencional de materiais.** São Paulo: PMI – EPUSP, 2000. p. 128 – 132.
57. FEINPRÜF PERTHEN GmbH. **Perthometer S3P. Drive Unit PGK. Technical Data.** 3752564-1.7.92 [199?] Catálogo.
58. MITUTOYO. **Surftest SV-600 Series 178.** Catalog No. E4127. 278.389404 ①EPR[199?].
59. RANK TAYLOR HOBSON. **Form Talysurf Plus.** Catalogue 291-27E2/294

CS 5m. [199?].

60. GUO, N. S.; LOUIS, H.; MEIER, G.; OHLSEN, J. **Abrasive water jet cutting. Improvement of the surface quality.** In: PACIFIC RIM INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER JET TECHNOLOGY, Hiroshima, 1995. **Proceeding:** Pacific Rim International Conference On Water Jet Technology, Hiroshima, 1995. p. 469 – 480.
61. GUO, N. S.; LOUIS, H.; MEIER, G.. **Surface structure and kerf geometry in abrasive water jet cutting: Formation and optimization.** In: AMERICAN WATERJET CONFERENCE, 7<sup>TH</sup>, Seattle, 1993. **Proceeding:** Hashish - WJTA, Seattle, 1993. p. 1 – 25.
62. KOVACEVIC R., HASHISH M., MOHAN R., RAMULU M., KIM T.J., GESKIN E.S. State of art of research and development in abrasive waterjet machining. In: Journal of Manufacturing Science and Engineering. Transactions of the ASME. Vol. 119, pp 776 – 785. Novembro, 1997.
63. BORTOLUSSI, A.; CICCUCI, R. **Contour cutting of thick steel plates.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON JETTING TECHNOLOGY, 14<sup>th</sup>. 1998. BHR Group Conference Series, Publication No. 32, edited by H. Louis, pp273 –284, 1998
64. ESTADOS UNIDOS. Waterjet Technology Association. **“Recommended practices for the use of manually operated high pressure waterjetting equipment”** 3<sup>th</sup> Edition. 6<sup>th</sup>. Printing. Published: WjTA, February 2000. St. Louis. MO. USA. p.44
65. ASSOCIATION OF HIGH PRESSURE WATERJETTING CONTRACTORS IN THE UNITED KINGDOM **"Code of Practice for the Use of High Pressure Waterjetting Equipment."** 2000. United Kingdom.
66. DICIONÁRIO AURÉLIO ELETRÔNICO SÉCULO XXI. Versão 3.0 nov. de 1999. Lexikon Informática Ltda. Brasil. Corresponde a versão integral do Novo Dicionário Aurélio Século XXI, de Aurélio Buarque de Holanda, publicado pela Editora Nova Fronteira. 1 CD-Rom.
67. FUJIMURA F. **Mecânica de rochas aplicada à cominuição de rocha.** 1999. 127p. Tese (Livre Docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas. São Paulo. Brasil

## GLOSARIO <sup>64, 65, 66, 67.</sup>

**Nota:** Equipamentos similares são usados hoje em operações de jato d'água em muitos países. É importante considerar que, onde seja possível, sejam utilizadas as mesmas palavras para nomear as mesmas partes do sistema, os mesmos materiais e as mesmas operações.

1. **Abrasivo (Abrasive)**- Todas partículas sólidas, solúveis ou insolúveis em fluido portador, introduzidas num jato de água, antes de bater na superfície alvo. Frequentemente, tais partículas são usadas para aumentar a efetividade de jatos de água puros em algumas aplicações. Podem ser usados abrasivos para limpar superfícies por pintar, ou também para cortar materiais.
2. **Sistema de alimentação de abrasivo (Abrasive Feed System)** - Sistema que inclui um recipiente de armazenamento ou silo para o abrasivo, uma mangueira ou tubo para levar o abrasivo para o ponto onde é inserido no jato de água, e um dispositivo para inserção do abrasivo no fluxo do jato de água. (Fig. A-1).
3. **Jato abrasivo (Abrasive Jet)** - Jato de água no qual são introduzidas partículas sólidas no fluxo antes do jato bater no alvo. Tais partículas abrasivas podem ser introduzidas de três modos: abrasivo entrante, abrasivo externo, e polpa de abrasivo.
  - 3.1 - **Jato abrasivo entrante (Entrained Abrasive)** - As partículas são adicionadas ao de jato depois do fluxo ser acelerado no orifício da jóia, mas antes que o fluxo resultante tem sido reformado através do tubo focalizador.

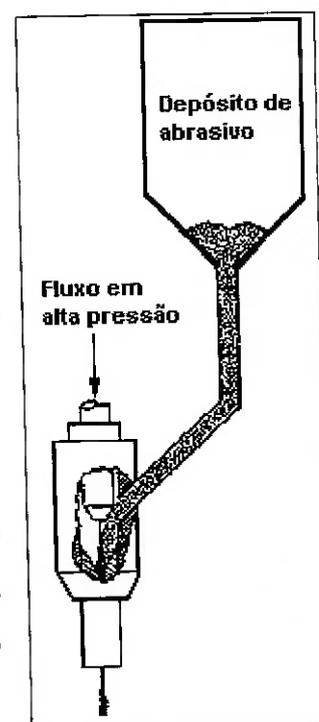


Fig. A-1

3.2 - **Jato abrasivo externo (External Abrasive)** - As partículas são somadas ao jato de água depois que deixa o orifício final.

3.3 - **Jato de polpa abrasiva (Slurry Abrasive)** - As partículas são

somadas à água antes dela ser acelerada pelo orifício da jóia.

**4. Dispositivos automáticos de alívio de pressão (Automatic Pressure Relief Devices)** - Dispositivos incluídos no sistema de jato de água de alta pressão para prover uma via de limitar a pressão do sistema automaticamente. Estes podem ser:

- a) Válvulas de regulação automática da pressão ("Automatic Pressure Regulating Valves")
- b) Discos de ruptura / explosão, quando montados em um suporte apropriado. ("Bursting and rupture discs, when set in a proper holder")
- c) Válvulas de desvio ("Bypass Valves")
- d) Válvulas de alívio de pressão ("Pressure Relief Valves")

**4.1 - Válvulas de regulação automática da pressão ("Automatic Pressure Regulating Valves")** - Válvula usada para controlar automaticamente a pressão de trabalho num sistema de jato de água de alta pressão pelo controle do fluxo de água desviado. Quando a pressão no sistema excede um fixado nível, a válvula é aberta parcialmente. Quanto maior é a abertura da válvula, maior quantidade de água é desviada e menos fluxo passa ao bocal. A água que passa pela válvula pode ser dirigida para o reservatório de provisão da bomba ou para outra disposição.

Uma válvula de regulação automática de pressão pode ser usada para controlar a pressão de operação na qual o sistema opera, e se assim, a válvula deve ser testada para assegurar que está ajustada no valor correto antes que seja usada em cada operação do jato de água.

Quando não há demanda de água em alta pressão, a válvula pode se usar para assegurar a diminuição da pressão do sistema abaixo de um baixo nível. A válvula é freqüentemente chamada como válvula de descarga.

**4.2 - Discos de ruptura / explosão, quando montados em um suporte apropriado. ("Bursting and rupture discs, when set in a proper holder")** - Disco metálico colocado em suporte especialmente projetado que rompe quando a pressão a ele aplicada exceda o nível configurado. Os discos

podem ser elaborados de diferentes materiais e tamanhos. Para pressões determinadas serão usados discos de tamanhos apropriados. O suporte do disco deve ser projetado de forma que a água que o atravessa não seja dirigida ao operador ou a outras partes do sistema de jato de água.

**4.3 - Válvulas de desvio ("Bypass Valves")** – Válvula que pode ser ajustada pelo operador, tanto manual ou automaticamente, para controlar o fluxo, e deste modo a pressão do jato emitido pelo bocal.

**4.4 - Válvulas de alívio de pressão ("Pressure Relief Valves")** – Válvula normalmente mantida em posição fechada por dispositivo mecânico, tal como uma mola. É projetada para abrir quando a pressão do sistema exceda o valor prefixado. O Dispositivo automático de alívio de pressão deve ser montado próximo da saída da bomba de pressão, em vista da pressão neste ponto ser a maior do sistema. Este local permitirá a redução mais imediata da pressão da bomba, sem reter as altas pressões do fluxo a jusante.

- 5. Pressão de ruptura (Burst Pressure)** - Pressão interna, dentro dum componente dum sistema de jato de água de alta pressão, na qual ele se rompe.

Nota: A bomba de alta pressão sofre recarga cíclica por causa do movimento recíproco dos pistões. Isto irá provocar a fadiga nas partes do sistema de forma que, com o tempo, a resistência dos componentes declina.

- 6. Coletor (Catcher)** - Quando um jato de água puro ou abrasivo é usado numa operação de corte, um dispositivo pode ser colocado no lado oposto do alvo de corte para coletar o jato remanescente, abrasivo, e partículas de material. O coletor é provido com um tubo de resíduos que leva este material fora da área.
- 7. Válvula de comutação (Changeover Valve)** - Válvula que o operador pode ajustar para enviar a água pressurizada da bomba para qualquer das diversas peças do equipamento do jato de água alimentado pela bomba. Esta válvula pode ser operada manualmente ou por um circuito secundário anexado ao sistema de jato de água de alta pressão.

8. **Bocal de colimação (Collimating Nozzle)** – Bocal secundário, de carbeto de tungstênio, colocado abaixo da câmara de mistura para focar o fluxo de alta pressão do jato de água e abrasivo em sistemas de jato de água convencionais de mistura de abrasivos. (Fig. A-2).

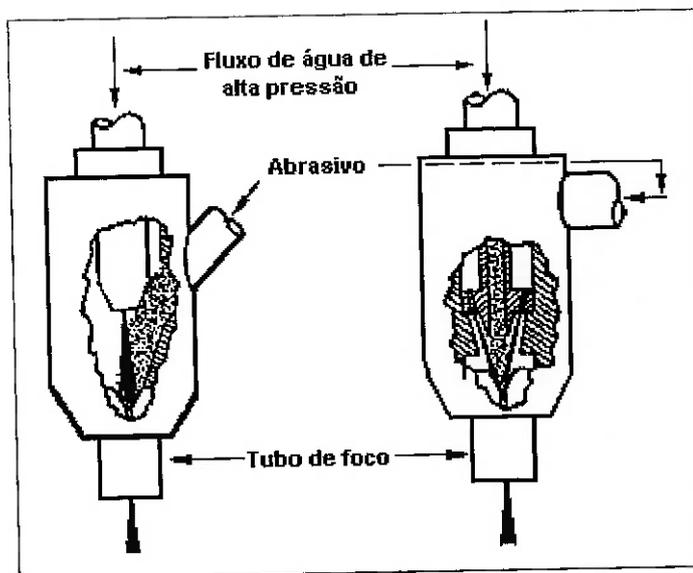


Fig. A-2

9. **Válvula de controle de ação seca (Dry Shutoff Control Valve)** - Válvula controlada manualmente pelo operador da lança ou do bocal para iniciar e parar o fluxo de água do bocal. Apesar do fechamento desta válvula parar o fluxo de água ao bocal, ela mantém a pressão de trabalho na linha de suprimento ao sistema. Quando esta válvula é usada o sistema deve também estar dotado com uma válvula de regulação automática de pressão para assegurar que a pressão de trabalho não seja excedida. Quando esta válvula é usada o operador deverá se preocupar com aliviar a pressão nas linhas de suprimento de água depois da bomba ser fechada. Isto é, assegurar que o sistema não é deixado sob pressão. Esta válvula também pode ser operada por um circuito de força anexo ao sistema de jato de água de alta pressão.
10. **Pistola de gatilho duplo (Double Trigger Gun)**- Pistola de jato de água com dois gatilhos que requerem ser ativados, um com cada mão, pelo operador, para gerar um jato de água de alta pressão.
11. **Sistema de descarregamento (Dump System)** - O sistema deve ser equipado com um dispositivo que tanto desliga a bomba, como a põe a

baixas revoluções por minuto (rpm), desvia o fluxo, ou, reduz a pressão de descarga a um baixo nível. O sistema de descarga será controlado manualmente só pelo operador do bocal. O dispositivo acionador do sistema de descarga deve estar protegido contra operações acidentais. Este dispositivo será controlado pelo operador com a mão ou o pé e deve descarregar o fluxo de água de alta pressão se o operador o aciona. Onde a água se descarrega através de um sistema de descarregamento ela não é imediatamente solta ao ar, mas passa por uma linha de descarga, a linha de descarga precisa ser segura de tal modo que ela não vibre quando ativada.

#### **11.1 - Válvula de controle do descarregamento (Dump Control Valve)**

– A válvula que controla o descarregamento é normalmente operada manualmente pelo operador da lança ou do equipamento de jateamento. Esta válvula está normalmente próxima do operador para enviar a água ao bocal. Quando a válvula é liberada, automaticamente para o fluxo de água para a lança ou conjunto do bocal, ao ser aberta passará um maior fluxo de água diminuindo a pressão do jato. Para que isto seja efetivo, ambos, a passagem através da válvula e o diâmetro da linha de alívio deverão ser largas o suficiente para não apresentar resistência significativa ao desempenho do fluxo de água, incluso até mesmo com a máxima produção da bomba. O tamanho da válvula deverá ser selecionado de maneira que não gere pressão de retorno significativa a taxa máxima possível de trabalho da bomba.

Esta válvula pode também ser usada com um sistema de pressão, elétrico ou piloto, que inclui circuitos adicionais que devem ser acoplados à válvula para que possa ser acionada. Estes sistemas devem ser projetados de tal forma que se a válvula falha, ela se abre.

#### **11.2 - Sistema de descarregamento controlado por solenóide ou eletricamente (Solenoid and Electrically Operated Control Dump Systems)** – Todos sistemas de descarregamento controlados eletricamente devem ser projetados com segurança contra falhas. Sistemas de descarregamento de voltagem de corrente alternada (AC) ou corrente

direta (DC), manipulados por pessoal, não devem exceder 24 volts e devem ser protegidos com fusíveis.

12. **Acoplamentos terminais e uniões (End Fittings and Couplings)** – Acoplamentos terminais e uniões de tubulações de alta pressão devem ser fabricadas para serem compatíveis com as tubulações e devem ser testadas como uma unidade.
13. **Filtro ou coador (Filter or Strainer)** – O sistema de água deve estar equipado com filtro ou coador para evitar que partículas estranhas limitem o fluxo nos orifícios do bocal ou cause danos aos selos da bomba, etc. O coador ou o filtro deve ser capaz de remover partículas menores que metade do diâmetro da menor abertura. Filtros de dimensões menores são fortemente recomendados, visto que a bomba e outros componentes do sistema irão durar muito mais tempo.
14. **Lança flexível (Flexible Lance)** - Tubo flexível ou seção de tubulação que leva água ao bocal; normalmente localizado entre o gatilho ou válvula de controle e o bocal.
15. **Válvula de controle por pedal (Foot-controlled Valves)** – Válvula de controle projetada de tal forma que o operador a possa acionar com o pé (Fig. A-3). Isto permite ao operador usar ambas mãos para segurar e mover a lança e/ou conjunto do bocal.

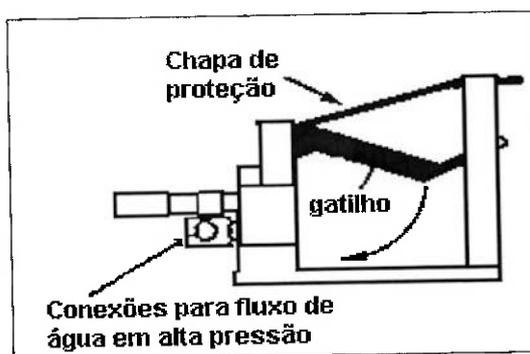


Fig. A-3

Quando uma válvula de pé é usada, ela precisa ser colocada num suporte que protege a válvula de ser operada acidentalmente e deve ser suficientemente robusta de tal modo que não se mova acidentalmente ou vire quando for usada.

16. **Mangueira de alta pressão (High Pressure Hose)** – Uma tubulação

flexível que pode ser usada para levar água e/ou outros fluidos de uma parte do sistema de jato de água de alta pressão para outra. A mesma deverá resistir, como mínimo, 2,5 vezes a pressão de trabalho projetada e certificada pelo fabricante. A mangueira deverá se testar numa pressão 1,5 vez a de trabalho.

Nota: A mangueira não devesa usar-se a pressão acima da recomendada pelo fabricante como pressão de trabalho.

**16.1 Mangueiras termoplásticas (Thermoplastic Hoses)** – Como mangueiras termoplásticas podem falhar e criar um furo muito pequeno que é um jato perigoso formado, este tipo de mangueira não deve ser usada com jato de água a não ser que tenha sido apropriadamente projetado para uso na operação com jatos de água.

**17. Sistemas de jato de água de alta pressão (High Pressure Waterjet Systems)** – Sistemas de jato de água de alta pressão são sistemas de fornecimento de água que tem bocais cuja função é aumentar a velocidade de líquidos. Partículas sólidas ou substâncias químicas podem também ser introduzida, mas a saída em todos os casos será um feixe livre.

Segundo as práticas recomendadas pela Waterjet Technological Association, o sistema deve incluir a bomba (dispositivo produtor da pressão do fluxo), tubulações, lanças, bocais, válvulas, dispositivos de segurança, e anexados sistemas de aquecimento ou sistemas de injeção. Jatos de água de alta pressão são usados em varias faixas de pressão. As seguintes divisões são feitas para esclarecer estas faixas:

**17.1 - Limpeza com água em alta pressão (High Pressure Water Cleaning)** – Usa água em alta pressão, com ou sem adição de outros líquidos ou partículas sólidas, para remover materiais indesejáveis de varias superficies, e onde a pressão da bomba se encontra entre 34 MPa e 204,1 MPa.

**17.2 - Corte com água em alta pressão (High Pressure Water Cutting)** – Usa água em alta pressão, com ou sem adição de outros líquidos ou partículas sólidas, para penetrar dentro de superficies de materiais com o

propósito de corta-lo, e onde a pressão da bomba se encontra entre 34 MPa e 204,1 MPa.

**17.3 - Limpeza de pressão (Pressure Cleaning)** – Usa água pressurizada, com ou sem adição de outros líquidos ou partículas sólidas, para remover materiais indesejáveis de varias superficies, e onde a pressão da bomba e menor que 34 MPa.

**17.4 - Corte de pressão (Pressure Cutting)** – Usa água pressurizada, com ou sem adição de outros líquidos ou partículas sólidas, para penetrar na superfície de um material com o propósito de corta-lo, e onde a pressão da bomba é menor que 34 Mpa.

**17.5 - Limpeza com água a ultra-alta pressão (Ultra High Pressure Water Cleaning)** – Usa água em alta pressão, com ou sem adição de outros líquidos ou partículas sólidas, para remover materiais indesejáveis de diferentes superficies, e onde a pressão da bomba excede 204,1 MPa.

**17.6 - Corte com água de ultra – alta pressão (Ultra High Pressure Water Cutting)** - Usa água em alta pressão, com ou sem adição de outros líquidos ou partículas sólidas, para penetrar dentro da superfície de um material com o propósito de corta-lo, e onde a pressão da bomba excede 204,1 MPa.

- 18. Conjunto de tubulação (Hose Assembly)** – A tubulação com uma adequada conexão final, em cada extremidade do tubo, de acordo com as especificações do fabricante.
- 19. Coberta de Tubulação (Hose Shroud)** – Um pedaço de material flexível, usualmente em formato de tubo ao redor de uma tubulação ou através da ligação com a pistola de jateamento. A cobertura fornece alguma proteção instantânea de um rompimento da tubulação. Ela não forma uma barreira permanente ao fluxo de água de uma tubulação danificada.
- 20. Pistola de jateamento (Jetting Gun)** – Dispositivo operado manualmente usado freqüentemente com jatos de água manuais (Fig. A-4). Normalmente ligada ao sistema de alta pressão pelo conjunto da tubulação de alta pressão. A pistola é constituída de válvula de controle, montada no interior de uma proteção, uma seção de lança, e então o

conjunto do bocal, que pode incluir um ou mais bocais. A pistola pode ainda incluir um suporte de braço e protetor de ombro e/ou um ou mais suportes de mão.

A pistola pode ser definida ulteriormente pelo tipo de válvula de controle que é usada para aliviar a pressão. Quando a pressão é descarregada na atmosfera quando a válvula é aliviada, então a pistola é de descarga, quando a pressão é retida no sistema, pelo uso de uma válvula de controle de ação seca, então a pistola é uma pistola de controle de ação seca.



Fig. A-4

- 21. Extensão de pistola de jateamento (Jetting Gun Extension)** - É um pedaço de tubo, tanto lança ou cano, usado para estender a distância da pistola. As peças da extensão devem ser fabricadas de materiais adequados e com conexões de extremidades apropriadas para a aplicação. Toda extensão deve ter um mínimo de resistência a ruptura de pelo menos 2,5 vezes a real mais elevada pressão de trabalho usada. Nos casos de labores de desentupimento, as extensões deverão estar marcadas, no mínimo, a 60 cm do bocal para alertar ao operador da proximidade do bocal. Também, quando o comprimento e o acoplamento rígido do bocal é menor que o que está no interior do tubo, uma extensão de tubulação rígida de comprimento não menor que o diâmetro do tubo a ser limpo deveria ser fixado atrás do bocal, ou um escudo ou proteção de segurança satisfatória deveria ser colocada para proteger o operador. Isto impede ao bocal de se virar atrás 180° e se dirigir para o operador.
- 22. Gatilho da pistola de jateamento (Jetting Gun Trigger)** - A válvula de controle tem um gatilho que facilita ao operador o controle do dispositivo. Este gatilho deveria se projetar para permitir operações fáceis com luvas de proteção. O gatilho deve incluir uma trava que impeça a

operação do sistema sem a liberação da mesma.

**23. Distribuidor de Jateamento (Jetting Manifold)** – O distribuidor fornece uma ligação na extremidade da lança na qual vários bocais individuais ou suportes de bocal podem ser enfileirados para distribuir os jatos de água sobre um dado padrão. Bocais alternadores podem ser dirigidos para frente e para trás do distribuidor para reduzir ou mesmo balancear o esforço exercido pelos jatos no distribuidor. Particularmente ao limpar superfícies internas, podem ser usados orifícios de bocal que tem jatos que emitem a algum ângulo ao corpo do bocal. Frequentemente estes são projetados de forma que as forças de reação dos jatos opostos são iguais, enquanto reduzem o desequilíbrio do operador. Porém, se um orifício de bocal é danificado ou bloqueado, então o fluxo de tais jatos opostos já não pode equilibrar as forças. Isto pode lançar uma força de lado súbita e inesperada no bocal que pode fazer o operador perder o controle. Então, estes orifícios devem ser testados, em particular antes da operação, e só devem ser levados à pressão quando situados dentro da peça de trabalho. A lança e o operador devem estar dispostos de tal modo para desligar o sistema sem danos no caso do bocal estar preso, causando um esforço desbalanceado.

**24. Lançamento (Lancing)** - Uma aplicação onde uma lança rígida ou flexível combinado com bocal são inseridos no extremo de um duto ou interior de um produto tubular.

**24.1 - Lança flexível (Flexible Lance)** – Um tubo rígido ou seção de tubo ou mangueira flexível que leva a água para o bocal ou para o distribuidor de bocais.

**24.2 - Lança rígida. (Rigid Lance)** – Um tubo rígido metálico usado para trasladar a água ao bocal ou ao bocal distribuidor.

**25. Desentupidora (Moleing)** - Uma aplicação na qual uma mangueira provida de um bocal é inserido em, e retraído do, interior de um tubo. É um sistema comumente usado com um bocal autopropelido para limpar as superfícies internas de canos ou drenos (Fig. A-5) As desentupidoras podem ser autopropulsionadas pelos seus jatos direcionados para trás ou

podem ser fabricados para terem varias formas, dimensões e combinações de jatos dirigidos para frente e para trás. A desentupidora deve incluir, diretamente atrás do conjunto do bocal, uma seção de tubulação rígida ou tubulação suficientemente longa que previne a desentupidora dos giros em volta do tubo.

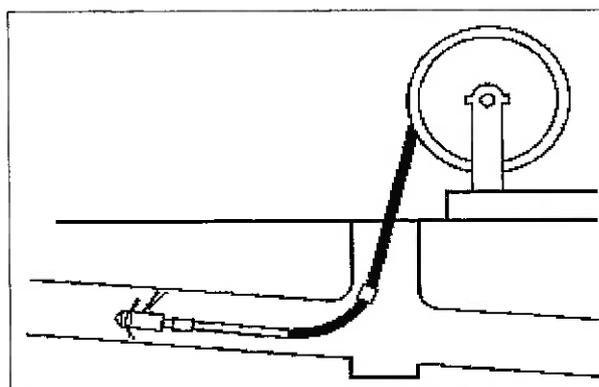


Fig. A-5

- 26. Bocal (Nozzle)** – Dispositivo com um ou mais orifícios pelos que descarrega a água do sistema. O bocal restringe a área de fluxo do fluido, acelerando a água até a velocidade requerida e conformando a mesma aos padrões de fluxo requeridos. Comumente, os bocais são também referidos como coroa, ponta, ponta de corte, ou orifícios. O bocal pode ser definido pelo tipo de jato que gera.
- 27. Suporte do bocal (Nozzle Holder)** - A conexão em fileira que suporta um suplemento de bocal e que o conecta ao distribuidor de jateamento ou extensão da lança.
- 28. Suplemento do bocal (Nozzle Insert)** - Bocal substituível, normalmente provido com um orifício e projetado para se ajustar em um suporte de bocal.
- 29. Operador (Operator)** – Pessoa treinada e com conhecimentos demonstrados, habilidade e experiência para montar , operar, e manter o sistema de jato de água.
- 30. Operador estagiário (Operator Trainee)** – Pessoa não qualificada, carente de conhecimentos, habilidades e/ou experiência, em estágio para se formar como operador que trabalhe sem supervisão.
- 31. Orifício (Orifice)** – Abertura ao final do bocal através do qual sai o jato

de água do sistema.

- 32. Manômetro de pressão** (Pressure Gauge) – O sistema de jato de água de alta pressão deverá ser provido de manômetro que indica a pressão desenvolvida em tempo real. O manômetro deverá dispor de escala com pelo menos cinquenta por cento (50%) acima da pressão máxima de trabalho do sistema, e deverá ser fixado um retentor de pressão para maior segurança na leitura da pressão.
- 33. Intensificador de pressão** (Pressure Intensifier) – A bomba que intensifica a pressão da água fornecida, usando a redução da área de um pistão comum para multiplicar a pressão de fluido motriz, o qual usualmente é óleo.
- 34. Bomba de pressão** (Pressure Pump) – A bomba que acrescenta a pressão da água entregada a ela e que ela envia a conexão múltipla comum, na qual estão fixados mangueiras flexíveis, ou tubos rígidos conectados a lanças com bocais anexados. Esta bomba pode ser móvel ou de montagem permanente, e freqüentemente tem êmbolo mergulhador positivo que prove um fluxo constante de água a uma velocidade de rotação dada. A bomba deverá possuir uma chapa permanente com a informação seguinte:
- (a) Nome do fabricante;
  - (b) Modelo, número de serie, e ano de fabricação;
  - (c) Desempenho máximo em galões ou litros por minuto e pressão em bar ou psi; e
  - (d) Esboço dos procedimentos de segurança recomendados.
- 35. Liberação de pressão** (Pressure Relief) – O sistema de jato de água de alta pressão deverá ter um dispositivo automático de liberação no lado de descarga da bomba.
- 36. Jato de água pulsante** (Pulsating Waterjet) - Jato que consiste em balas ou pulsos individuais de água ou líquidos.
- 37. Lança rígida.** (Rigid Lance) – Tubo rígido metálico usado para estender o bocal do final da mangueira ou da pistola de jato.

- 38. Lanceando rígido (Rigid Lancing)** - Uma aplicação por meio do qual uma lança ou a extensão da pistola de jato é provida com um bocal, conexão de bocal, ou bocal múltipla. Esta lança é inserida em, e retirada do interior de um tubo, tanque, ou recipiente.
- 39. Discos de ruptura (Bursting or Rupture Disc)** - Disco metálico colocado em suporte especialmente projetado que falhara quando a pressão a ele aplicada exceda o nível configurado. Os discos podem ser elaborados de diferentes materiais e tamanhos. Discos de tamanhos apropriados serão usados em pressões determinadas. O suporte do disco deverá ser projetado e colocado de maneira a impedir que a água que passa por ele forme jatos que se atinjam ao operador ou a outros componentes do sistema de jato de água.
- 40. Conexão de bocal auto-rotativo (Self-Rotating Nozzle Assembly)** - Dispositivo com uma conexão de pino giratório fixada à mangueira ou a seção da lança. O dispositivo possui dois suportes opostos para jatos, onde a reação aos jatos causa a rotação da conexão dos bocais sem ação de força externa alguma.
- 41. Espingarda de jato (Shotgunning)** - Dispositivo de operação manual por meio do qual a conexão da lança e o bocal podem se manipular em praticamente todos os planos de operação.
- 42. Barra pulverizadora (Spray Bar)** - Ligação múltipla especialmente projetada para distribuir bocais ao longo dum tubo linear. A barra pulverizadora é usada para prover o arranjo necessário para instalar jatos ventiladores sobrepostos. Frequentemente são usadas para limpeza de grandes áreas.
- 43. Vara iniciadora (Starter Rod)** - Peça de tubo rígido montado detrás da conexão do para utilizar uma lança flexível.
- 44. Suporte manual (Support Handle)** - Manipulador adicional que pode ser anexado à pistola de jato para prover um suporte adicional al operador ao dirigir a pistola. O manipulador adicional pode ser fixado com um interruptor para funções adicionais de controle.
- 45. Jato de água (Waterjet)** - Fluxo ou feixe de água que se movimenta

rapidamente, de diferentes formas e tipos que saem dum orificio de bocal. A velocidade do jato depende da pressão que suporta a gota ao atravessar pelo orificio de bocal.

**45.1 - Jato ventilador (Fan Jet)** – Jato projetado para espalhar-se ao sair do orificio. Usualmente a divergência é restrita a um plano, porém não necessariamente. O ângulo de conicidade do jato medido do eixo, com frequência, é utilizado para denominar o jato produzido. A aplicação típica deste jato é na limpeza de grandes áreas que precisam pouca energia para remover a matéria indesejada.

**45.2 - Retrojato (Retro Jet)** – Jato dirigido em direção inversa ao movimento do bocal. O retrojato é tipicamente usado para dar força de empurre ao bocal dentro da peça objeto do trabalho e para permitir aos jatos a limpeza de locais, caso contrario, inacessíveis. Deve ser usado para equilibrar a ação do jato dirigido para frente, deste modo resultará em zero empurre para aplicações subaquáticas ou em andaimes.

**45.3 - Jato direto (Straight Jet)** – O jato direto sai de um orificio circular e é usado para levar o máximo de força máximo ao objetivo com o mínimo de dispersão de energia. Uma aplicação típica é para cortar ou para limpeza geral de materiais com maior tosquia e/ou concreto. Um jato direto também é conhecido como um jato de zero - grau, desde que não é projetado para se espalhar.

**46. Cabo antichicoteio (Whip Lock)** - Peça curta de arame ou cabo enlaçado na conexão entre duas mangueiras conectadas por uma junção. O cabo antichicoteio é projetado para estabelecer uma fechadura de segurança que evite o chicoteio das mangueiras em caso de fraturas da junção.

**47. Área de trabalho (Working Area)** – A área entre as paredes ou barreiras da mesa XY, onde aparece o alerta ou restringe o acesso, na qual são efetuados trabalhos com jatos de água.

**48. Pressão de trabalho (Working Pressure)** – A máxima pressão recomendada pelo fabricante, à qual deverão ser usados os componentes. A pressão de trabalho não deverá exceder a quarenta por cento (40%) da

pressão de ruptura dos componentes. Às vezes esta pressão é referida como pressão de operação. O sistema não deve ser operado a pressões inferiores às pressões de trabalho mínimas de qualquer dos componentes do mesmo.

- 49. Lavra com maçarico (Flame jet ou jet piercing)** – Neste sistema, um grande maçarico, que utiliza diesel e ar comprimido, faz sulcos na rocha aplicando o princípio físico da reação ao calor com expansão diferente dos minerais que compõem a rocha granítica. Sobretudo o quartzo, que ao elevar-se a temperatura muda de sistema cristalino, do quartzo- $\alpha$  ao da cristobalita, mudando de volume, e se desprende da rocha mãe, o que origina o sulco que limita o bloco da rocha ornamental.
- 50. Número de maquinabilidade (Number of Maquinability)** - Coeficiente determinado para cada tipo de material a ser cortado, incluído dentro do software do módulo de jato abrasivo.
- 51. Rocha (Rock)** - Agregado natural formado de substâncias minerais, resultado de um processo geológico determinado, seja ígnea, metamórfica ou sedimentar, que constitui parte essencial da litosfera. O termo é aplicado aos agregados de diferentes tamanhos, da rocha sólida do manto terrestre até a areia, a argila e o barro. O material rochoso tem papel dominante nos processos de fragmentação da rocha, incluindo: perfuração, corte, detonação e britagem. Em geral, as rochas são fonte de matérias primas minerais e elas mesmas sem ser submetida a processos físicos e químicos complexos, de beneficiamento e concentração, podem ser consideradas também como matérias primas naturais, como no caso das rochas ornamentais.
- 52. Rocha ornamental (Dimension stone)** - Rocha, que por sua origem pode ser ígnea, metamórfica ou sedimentar, com arranjos de textura e estrutura esteticamente agradáveis, que podendo se polir ou não, são desdobradas, cortadas em chapas, aplicadas a fachadas, pisos, e paredes na construção de casas, prédios e locais de utilidade pública.
- 53. Tubo de foco (Collimating Nozzle)** – Vide Bocal de colimação.
- 54. Tubo de mistura (Collimating Nozzle)** – Vide Bocal de colimação.