

CARLOS TADEU LAUAND

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO CORTE DE ROCHAS
POR JATO D'ÁGUA ABRASIVO**

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

Área de Concentração:
Engenharia Mineral

Orientador:
Prof. Wildor Theodoro Hennies

São Paulo

2001

CARLOS TADEU LAUAND

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO CORTE DE ROCHAS
POR JATO D'ÁGUA ABRASIVO**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Engenharia.**

São Paulo

2001

Agradecimentos

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

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

Aos professores Antonio Stellin Jr., Fernando Fujimura e Lindolfo Soares, pelas valiosas sugestões.

Ao Prof. Raimondo Ciccu, pela assistência e sugestões.

A Maria Cristina Martinez Bonesio, pela atenção dispensada à bibliografia.

A Yukiko Osawa Rodrigues, pela paciência.

A Jorge Sakamoto, pelo grande auxílio nos experimentos e preparo dos corpos de prova.

A Eliana Satiko Mano, pelo auxílio na obtenção das fotomicrografias.

Aos irmãos Fiorelini, de Piracaia, pelas valiosas informações.

Às irmãs Correia, de Campos do Jordão, pela atenção dispensada.

A Deus, por permitir que tudo isso se realizasse.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Símbolos

Resumo

Abstract

1. Introdução	1
2. Histórico	4
3. Revisão Bibliográfica	10
3.1 Os Jatos Fluidos	10
3.2 Abrasivos.....	16
3.3 Mecanismos de Remoção do Material	19
3.4 Acabamento das superfícies.....	31
3.5 Aspectos Ambientais.....	35
4. Seleção das Rochas Ornamentais.....	37
4.1 As Amostras de Rochas Ornamentais.....	38
4.2 Características Tecnológicas das Rochas.....	42

5. Trabalhos de Laboratório	46
5.1 Preparação dos Corpos de Prova	46
5.2 Explicação dos Parâmetros do Processo	48
5.3 Ensaios	53
6. Resultados.....	59
6.1 Cortes Retilíneos.....	60
6.2 Cortes Curvilíneos	67
7. Interpretação dos Resultados	72
8. Conclusões	99
9. Referências Bibliográficas	101
Apêndice A. Custos Operacionais	
Apêndice B. Glossário	

Lista de Figuras

Figura 1	Lavra hidráulica com monitores em Parelheiros, município de São Paulo	5
Figura 2	Esquema de um cabeçote de jato d'água abrasivo	13
Figura 3	Mecanismos de remoção de material por erosão de partícula sólida.....	22
Figura 4	Características de remoção de material por partícula sólida	24
Figura 5	Os dois processos de remoção do material: impacto e rede de rompimento.....	25
Figura 6	Superfície de mármore Branco Campos do Jordão cortada através do processo de jato d'água abrasivo	31
Figura 7	Localização das pedreiras de rochas ornamentais coletadas.....	39
Figura 8	Bloco de granito Preto Piracaia extraído em 1938 e sua estrutura de transporte	40
Figura 9	Fachada do prédio que hoje abriga a Secretaria dos Negócios de Esporte e Turismo, em São Paulo	41
Figura 10	Formato final dos corpos de prova	46
Figura 11	Parâmetros do processo.....	50
Figura 12	Disposição dos corpos de prova para ensaio de corte retilíneo.....	54
Figura 13	Esquema ilustrando o atraso do jato no interior do material.....	55
Figura 14	Esboço dos cortes circulares.....	57
Figura 15	Ilustração dos parâmetros b_T e b_B em uma superfície de corte	61

Figura 16	Ilustração das alturas do corte liso e rugoso em uma superfície de corte.....	61
Figura 17	Digitalização da face superior dos corpos de prova.....	65
Figura 18	Digitalização da rampa dos corpos de prova.....	66
Figura 19	Altura do corte liso (h_{liso}) em relação à velocidade do bocal (v) para os granitos ensaiados (corte retilíneo).....	66
Figura 20	Altura do corte liso (h_{liso}) em relação à velocidade do bocal (v) para o mármore ensaiado (corte retilíneo).....	67
Figura 21	Esquema dos cilindros obtidos a partir do corte circular dos corpos de prova.....	68
Figura 22	Resultado da digitalização da amostra do granito Prata Interlagos após o ensaio de corte curvilíneo	71
Figura 23	Fotomicrografias da superfície do granito Vermelho Capão Bonito cortada por jato d'água abrasivo (região de corte liso).....	79
Figura 24	Fotomicrografias da superfície do granito Vermelho Capão Bonito cortada por jato d'água abrasivo (região de corte rugoso).....	80
Figura 25	Fotomicrografias da superfície do granito Vermelho Capão Bonito cortada por meio de serra diamantada	81
Figura 26	Fotomicrografias da superfície do granito Vermelho Capão Bonito submetida à lixa de granulometria 60 (levigado 60)	82
Figura 27	Fotomicrografias da superfície do granito Vermelho Capão Bonito submetida à lixa de granulometria 120 (levigado 120)	83
Figura 28	Fotomicrografias da superfície do granito Vermelho Capão Bonito submetida à lixa de granulometria 220 (levigado 220)	84
Figura 29	Fotomicrografias da superfície do granito Vermelho Capão Bonito submetida à lixa de granulometria 400 (superfície semi-lustrosa).....	85
Figura 30	Fotomicrografia da superfície polida do granito Vermelho Capão Bonito	86
Figura 31	Fotomicrografias da superfície do granito Vermelho Capão Bonito fraturada.....	87

Figura 32	Fotomicrografias da superfície do mármore Branco Campos do Jordão cortada por jato d'água abrasivo (região de corte liso).....	89
Figura 33	Fotomicrografias da superfície do mármore Branco Campos do Jordão cortada por jato d'água abrasivo (região de corte rugoso).....	90
Figura 34	Fotomicrografias da superfície do mármore Branco Campos do Jordão cortada por meio de serra diamantada.....	91
Figura 35	Fotomicrografias da superfície do mármore Branco Campos do Jordão submetida à lixa de granulometria 60 (levigado 60)	92
Figura 36	Fotomicrografias da superfície do mármore Branco Campos do Jordão submetida à lixa de granulometria 120 (levigado 120)	93
Figura 37	Fotomicrografias da superfície do mármore Branco Campos do Jordão submetida à lixa de granulometria 220 (levigado 220)	94
Figura 38	Fotomicrografias da superfície do mármore Branco Campos do Jordão submetida à lixa de granulometria 400 (superfície semi-lustrosa).....	95
Figura 39	Fotomicrografia da superfície polida do mármore Branco Campos do Jordão.....	96
Figura 40	Fotomicrografias da superfície do mármore Branco Campos do Jordão fraturada	97

Lista de Tabelas

Tabela 1	Número de maquinabilidade dos materiais mais utilizados na indústria	30
Tabela 2	Descrição das superfícies de corte em relação às variações de q	34
Tabela 3	Características tecnológicas do granito Vermelho Capão Bonito	43
Tabela 4	Características tecnológicas do granito Prata Interlagos	43
Tabela 5	Características tecnológicas do granito Preto Piracaia	44
Tabela 6	Características tecnológicas do mármore Branco Campos do Jordão.....	45
Tabela 7	Dimensões dos corpos de prova	47
Tabela 8	Parâmetros do processo e simbologia.....	49
Tabela 9	Velocidades do bocal utilizadas no ensaio de corte retilíneo.....	56
Tabela 10	Velocidades de corte circular para mármore	58
Tabela 11	Velocidades de corte circular para granitos.....	58
Tabela 12	Resultados do corte retilíneo do granito Preto Piracaia.	62
Tabela 13	Resultados do corte retilíneo do granito Vermelho Capão Bonito	63
Tabela 14	Resultados do corte retilíneo do granito Prata Interlagos	63
Tabela 15	Resultados do corte retilíneo do mármore Branco Campos do Jordão.....	64

Tabela 16	Valores obtidos no corte curvilíneo do granito Preto Piracaia	69
Tabela 17	Valores obtidos no corte curvilíneo do granito Vermelho Capão Bonito	69
Tabela 18	Valores obtidos no corte curvilíneo do granito Prata Interlagos	70
Tabela 19	Valores obtidos no corte curvilíneo do mármore Branco Campos do Jordão	70
Tabela 20	Comparação entre os valores estimados e experimentais para as profundidades de corte dos granitos	74
Tabela 21	Comparação entre os valores estimados e experimentais para as profundidades de corte do mármore	74
Tabela 22	Terminologia dos vários graus de acabamento de rochas ornamentais	76

Lista de Símbolos

b_B	largura na face inferior do corte
b_T	largura no topo do corte
C_d	coeficiente de descarga
c_L	comprimento do rompimento radial
C_v	coeficiente de velocidade
C_y	coeficiente de compressibilidade
d_0	diâmetro do orifício da jóia
d_F	diâmetro do bocal
d_f	diâmetro final do corte
d_i	diâmetro inicial do corte
d_p	diâmetro da partícula
E	módulo de elasticidade
E_N	número de erosão
$f(d_p)$	distribuição granulométrica do abrasivo
h	profundidade de corte total
h_{Cr}	profundidade do rompimento radial
h_{est}	profundidade de corte estimada
h_{iso}	altura do corte liso
H_p	dureza da partícula de abrasivo
h_{rug}	altura do corte rugoso
l_F	comprimento do bocal
\dot{m}_A	fluxo de massa de abrasivo
m_M	massa do material removido
m_p	massa da partícula abrasiva
\dot{m}_W	fluxo de massa de água
N_m	número de maquinabilidade
n_p	número de passos

p	pressão hidráulica
q	nível de qualidade de corte
Q_w	fluxo de água em volume
R	razão entre o fluxo de massa de abrasivo e de água
R_e	resistência à erosão
T_R	afunilamento do corte
v	velocidade do bocal
v_A	velocidade do jato d'água
V_M	volume de material removido
v_p	velocidade da partícula de abrasivo
x	distância de afastamento
β	função do coeficiente de Poisson do material alvo
γ	energia de fratura
η	eficiência de transferência de momento
φ	ângulo de impacto
ρ_M	densidade do material alvo
ρ_w	densidade da água
σ_f	perda no fluxo do jato d'água abrasivo

Resumo

O presente estudo consiste na avaliação da eficiência do processo de corte de rochas ornamentais através da nova tecnologia de jato d'água abrasivo. Estão descritos os vários tipos de jatos fluidos existentes, os princípios que regem o processo de corte por jato d'água abrasivo e o acabamento das superfícies cortadas. Além disso, são discutidos alguns aspectos ambientais.

Como complemento, o desempenho do processo foi testado em um mármore e três granitos. Os valores obtidos foram discutidos e comparados com valores estimados por modelos. O acabamento das superfícies cortadas pelo jato d'água abrasivo foi discutido e comparado com superfícies cortadas por outros métodos e também com superfícies "levigadas". Para tal, utilizaram-se fotomicrografias obtidas por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura.

Como principal conclusão desta contribuição, pode-se estabelecer que o desempenho do equipamento utilizado, para a aplicação no corte de chapas de rochas ornamentais paulistas, é excelente, permitindo confeccionar os mais complexos desenhos com grande precisão e reprodutibilidade.

Abstract

This study analyses the abrasive waterjet cutting process performance when applied on dimensional stones. It is described the various fluid jets in use today, the principles of the abrasive waterjet machining and the surface finishing. Also, it was discussed some environmental aspects.

The process performance was tested in one marble and three granites. The resulting cut geometry, smooth depth of cut, rough depth of cut and surface finishing are presented and discussed in terms of "polished" surface. SEM images was obtained from waterjet cutting surface, to compare it with other surfaces cut by different ways and polished in different degrees. A discussion about theoretically estimated values and those experimentally obtained was also made in this paper.

The main conclusion of this contribution is that the performance of the equipment, when applied to the cut of brazilian dimension rock slabs, is excellent, allowing to obtain the most complex design features with high precision and reproducibility.

1. Introdução

A tecnologia de corte por jato d'água abrasivo já é largamente utilizada nos países desenvolvidos. Isso pode ser constatado pela grande quantidade de material bibliográfico existente. No Brasil, ainda é pequeno o número de máquinas instaladas, mas podemos observar alterações neste panorama. Vários representantes de empresas fabricantes deste tipo de equipamento já começaram a se instalar no país, e é cada vez maior o interesse por máquinas de corte por jato d'água. Este fato é plenamente justificável, pois as vantagens oferecidas por este processo de corte são inúmeras. Em qualquer tipo de material, proporciona um corte preciso, com pouca perda, bom acabamento e sem aquecimento do material. Para o corte de rochas ornamentais, os resultados são, também, muito satisfatórios. É possível o corte de chapas de granito e de mármore com alta precisão, permitindo criar formas geométricas até então impossíveis de ser executadas através dos processos existentes. O acabamento das superfícies cortadas também é muito satisfatório, não necessitando, dependendo da aplicação, de processos posteriores de polimento.

Nesta dissertação visa-se estabelecer algumas considerações básicas sobre jatos d'água de alta velocidade e sua tecnologia mais avançada de jatos d'água abrasivos.

Inicialmente, é apresentado um histórico do uso de jatos d'água na área da mineração a céu aberto, subterrânea e por furos de sonda ou de controle remoto, técnica que vem sendo usada na área da lavra de minas, tanto para desmonte como para transporte ou manuseio do material na mina.

A seguir, um capítulo de revisão bibliográfica tenta mostrar aspectos mais recentes da avançada tecnologia dos jatos de alta velocidade gerados através de bocais de menores diâmetros, e que, indiretamente, conduzem a menores vazões ou fluxos de água, com um aumento da eficiência do processo. Tipos de jatos fluidos atualmente reconhecidos, abrasivos empregados e princípios dos métodos de erosão, bem como o acabamento das superfícies e alguns aspectos ambientais são os assuntos abordados.

Como complemento, foram realizados trabalhos práticos, iniciados com a seleção de rochas ornamentais para ensaios em laboratório. Quatro amostras foram ensaiadas: granito Preto Piracaia, granito Vermelho Capão Bonito, granito Prata Interlagos e mármore Branco Campos do Jordão.

Seguem-se os trabalhos de laboratório realizados nas amostras coletadas, com preparo dos corpos de prova, explanação dos parâmetros do processo utilizados nos ensaios e, finalmente, os ensaios em cortes retilíneos e circulares. O experimento foi realizado no Módulo de Jato d'Água Abrasivo instalado no Laboratório de Mecânica de Rochas do Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica

da Universidade de São Paulo. O projeto foi totalmente financiado pela FAPESP — Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.

A análise dos resultados e sua interpretação quanto ao acabamento da superfície de corte são os aspectos finais examinados.

Conclusões e recomendações para estudos futuros mais pormenorizados são apresentados no item final. Como complemento a essa dissertação de mestrado, o Apêndice A mostra os custos operacionais do processo e, no Apêndice B, podemos encontrar um glossário dos termos técnicos utilizados.

2. Histórico

O uso de jatos de água para desmonte de rochas sedimentares não consolidadas é denominado desmonte hidráulico ou mineração hidráulica. Esta técnica, muito antiga, consiste em dirigir o jato de água contra a rocha mineralizada, com o objetivo de fragmentá-la. O jato é também utilizado para deslocar o minério empalpado para um ponto de coleta onde este possa ser transportado por bombas e tubulações para as usinas de processamento de minerais.

Segundo SAVANICK (1999), o desmonte hidráulico iniciou-se por volta de 1830 para lavra de aluviões de minério de ouro nos Montes Urais, Rússia, e teve seu maior desenvolvimento nos campos de ouro da Califórnia, de 1852 a 1874.

Existem hoje três tipos de lavra ou mineração hidráulica: a lavra a céu aberto, a lavra subterrânea e a lavra por controle remoto (ou por furos de sondagem).

A lavra a céu aberto é praticada para obtenção de materiais de construção civil, ou materiais não metálicos industriais, tais como areias (para construção civil, para fundição ou para a indústria de vidros), cascalho (para construção civil) e argila (caulim para papel, cerâmica ou outras finalidades).

SOARES *et al.* (1998) descrevem o processo de desmonte hidráulico para obtenção de areia a ser empregada na construção civil. A figura 1 mostra este processo sendo aplicado na Viterbo Machado Luz Mineração Ltda., município de São Paulo. Pode-se observar os monitores de jato d'água desmontando a cobertura de rocha.

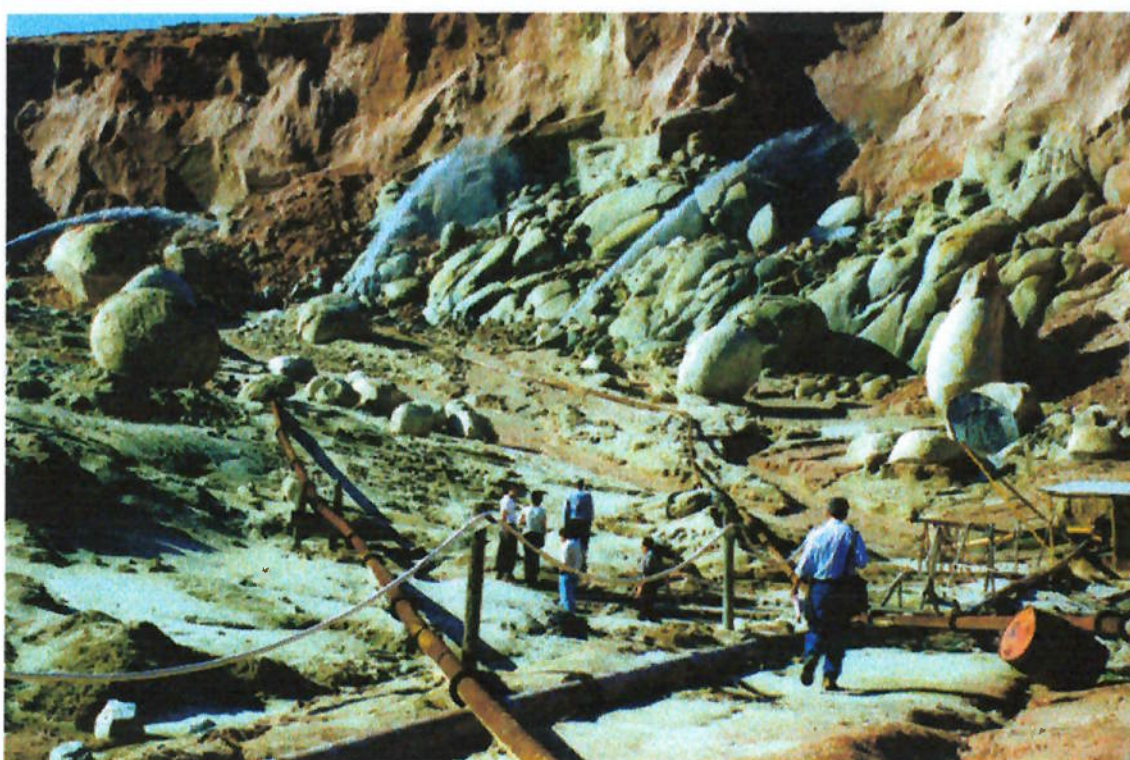


Figura 1 — Lavra hidráulica com monitores em Parelheiros, município de São Paulo.

O sistema trabalha a uma pressão de 0,245 MPa, com uma vazão de 450 m³/h. A água, recirculada, é lançada na rocha através de quatro bocais, com diâmetros de 25 mm, aproximadamente*.

* Informações gentilmente cedidas pelo engenheiro João Manoel Stevenson Braga, da Viterbo Machado Luz Mineração Ltda.

Jatos d'água de alta pressão para corte são também utilizados em combinação com explosivos para extração de granito. WYATT; PETERSON (1997) descrevem um sistema de corte utilizando um jato de água oscilante de 255 MPa de pressão e fluxo de 23 ℓ/min. Este sistema corta fendas de até 4,5 m de profundidade no granito. Estas fendas separam todo o bloco de granito na face de uma pedreira, com exceção do piso. O bloco é solto pela detonação de seu piso e é removido por guindaste. O sistema utiliza jato d'água oscilante (com movimentação perpendicular ao sentido de corte) para possibilitar a abertura de fendas largas (maiores que 5 cm) no granito.

A lavra subterrânea por desmonte e transporte hidráulico é praticada desde a década de 1970. GIVEN (1973) afirma que o básico na mineração hidráulica é o fato de que quanto mais elevada é a pressão, menor é o volume de água requerido para igual ou maior produção. Pesquisadores vem trabalhando com pressões iguais ou superiores a 690 MPa. Como corolário, a dimensão do jato está sendo reduzida a diâmetros muito pequenos (0,5 mm). O autor citado diz, ainda, que a alta pressão e o diminuto diâmetro do orifício do bocal são bem mais efetivos para cortar e evitam os problemas encontrados nos jatos de elevado volume de água.

Na moderna tecnologia do jato d'água, o grande fluxo de água dos bocais é substituído por um feixe de água de alta velocidade, no qual a "penetração na rocha" ocorre em segundos. O primeiro sistema de corte por jato d'água comercial foi desenvolvido para cortar tubos de papel laminado em 1971. No ano seguinte, o primeiro simpósio de tecnologia

de corte por jatos d'água teve lugar na Inglaterra, reunindo os principais pesquisadores e fabricantes para discutir o estado da arte e os projetos futuros da tecnologia do jato d'água. Desde então, esta tecnologia assistiu a um próspero crescimento.

No início da década de 1980, surgiu a idéia de combinar jatos de água com outros métodos de fragmentação. Este processo é aplicado nas máquinas de abertura de túneis de corte integral (*TBM — Tunnel boring Machines*). Estas cortam mecanicamente a rocha através de cortadores de disco e são equipadas com jatos d'água auxiliares. Estes jatos deixam o bocal com pressões da ordem de 345 MPa e cortam uma série de fendas paralelas em rochas duras. Os cortadores de disco removem, então, as aparas de rochas entre as fendas. Neste tipo de aplicação, os jatos de alta pressão são a principal fonte de energia de fragmentação da rocha, e trabalham em série com os cortadores de disco para fraturar a mesma. Este processo é chamado "corte mecanicamente assistido por jato de água".

Existe outra aplicação chamada "corte mecânico assistido por jato". Este método utiliza jatos d'água para erosão de detritos de rocha britada formada por ferramentas mecânicas, tais como trados ou coroas de ponta, durante o processo de corte da rocha. Nele, a energia do jato de água suplementa o processo de fragmentação, visto que a fonte principal de energia para a operação de partição é fornecida pela ferramenta mecânica. Este princípio tem sido aplicado pelos fabricantes britânicos de máquinas de túneis usadas em minas de carvão. Corte

assistido com jato d'água tem sido utilizado, também, em cortadeiras de tambor para produção nas frentes longas de carvão.

Todas as máquinas de mineração com jato de água acima descritas trabalham ou em minas a céu aberto ou em minas subterrâneas. Existem depósitos minerais que não podem ser lavrados por métodos convencionais de lavra a céu aberto ou subterrâneos. Alguns destes podem ser lavrados usando um método de mineração de controle remoto, chamado mineração por furo de sonda. Neste, uma ferramenta, incorporando um sistema de corte por jato de água e um sistema de bombeamento de polpa entrante no furo, é utilizada para lavar minerais através do furo de sonda, aberto na superfície ou em estações de subsolo, para uma área de rocha mineralizada. Os jatos d'água da ferramenta de mineração causam a erosão do minério, formando uma polpa que flui para o interior de uma bomba na base da ferramenta. A polpa é, então, transferida para a superfície e, depois, por tubulação, para uma usina de processamento. A água é reciclada para a ferramenta de mineração do furo de sonda.

A mineração por furo de sonda tem sido utilizada nos Estados Unidos, no Canadá e na antiga União Soviética. Este processo demonstra a viabilidade técnica da extração por controle remoto de carvão, minério de urânio, minério de fosfato, minério de ferro, areia, cascalho e âmbar. É um dos métodos de mineração menos agressivo ao meio ambiente. Nenhuma substância externa é introduzida no lençol de água subterrâneo e nenhuma cobertura precisa ser removida.

Em 1983, começaram a surgir os primeiros sistemas de jato d'água abrasivo. Nestes, partículas de abrasivo são aceleradas por um jato fluido de alta velocidade, gerado pela passagem da água, sob alta pressão, através de um orifício de pequeno diâmetro. A introdução do abrasivo no jato d'água permitiu o corte de materiais duros, como metais e rochas, com uma eficiência muito maior em relação ao jato d'água puro.

3. Revisão Bibliográfica

3.1 Os Jatos Fluidos

Os jatos d'água puros (também chamados jatos d'água plenos) de alta velocidade existem, como ferramenta de corte industrial, desde o início da década de 1970. Uma de suas aplicações na mineração está associada ao corte de blocos de granitos na frente de lavra. BORTOLUSSI *et al.* (1991) apresentam as características necessárias para a abertura de grandes fendas para a extração de granito. VASEK (1995) estuda a possibilidade, para a finalidade em questão, da utilização de um sistema misto: o corte convencional com a assistência do jato d'água. WYATT; PETERSON (1997) descrevem um equipamento para este tipo de aplicação, apresentando custos operacionais e resultados obtidos. Não mencionam os custos de aquisição do equipamento, e é justamente este custo um dos maiores impecilhos para a “popularização” desta técnica em corte de blocos de granitos em pedreiras.

O jato d'água puro também é utilizado para fragmentação do carvão na frente de lavra. RADIJKO (1995) apresenta o modelamento e os mecanismos que atuam neste processo.

ALITAVOLI; McGEOUGH (1997) apresentam uma aplicação interessante, até exótica, do jato d'água de alta pressão. Os autores descrevem um sistema para o corte de material orgânico, como a carne. MERLE *et al.* (1993) estudam os parâmetros que devem ser levados em consideração no processo de corte de alimentos por jato d'água. Uma das grandes vantagens deste método no corte de alimentos é a higiene: evita-se o contato do alimento com ferramentas ou mãos humanas.

O jato d'água puro também pode ser utilizado para remoção de camadas superficiais (com o propósito de limpeza, por exemplo) em diversos tipos de materiais. WU; KIM (1995) mostram os mecanismos que atuam neste tipo de aplicação. MABROUKI *et al.* (2000) analisam a aplicação de um jato d'água puro para a remoção de camadas de cobertura em materiais maleáveis.

Em aplicações industriais, as principais vantagens do jato d'água puro, em relação aos métodos de corte convencionais, são:

- Ausência de poeira ou qualquer outro tipo de poluição no ar;
- Alta velocidade de corte;
- Capacidade de cortes multidirecionais;
- Ausência do desgaste da ferramenta;
- Ausência de aquecimento;
- Ausência do perigo de incêndio associado à ferramenta.

Mesmo possuindo todas as vantagens enunciadas, o sistema possui desvantagens que tornam a sua aplicação inviável em determinados setores. Quando utilizado para o corte de materiais muito duros, como metais e cerâmica, requer uma bomba de alta pressão e vazão, consumindo muita energia. No caso do corte de blocos de granitos, exemplo mencionado anteriormente, o processo requer um motor de alta potência para acionamento da bomba hidráulica (WYATT; PETERSON, 1997).

No início da década de 1980, começaram a surgir os primeiros sistemas de jato d'água abrasivo. Neste sistema, partículas de abrasivo são aceleradas por um jato fluido de alta velocidade, gerado pela passagem da água, sob alta pressão, através de um orifício de pequeno diâmetro. Este orifício, geralmente de safira ou rubi, é chamado "jóia".

Dois sistemas distintos podem ser utilizados para misturar o abrasivo granular no jato d'água, ou seja, para gerar o jato d'água abrasivo. O primeiro processo é o chamado *ASJ*, sigla em inglês para *Abrasive Suspension Jet*, ou jato abrasivo de suspensão. Neste processo, o abrasivo, através de uma câmara, é pré-misturado ao jato d'água. O segundo processo é denominado *AWJ* (*Abrasive Water Jet*, ou jato d'água abrasivo). Neste, o abrasivo, e também uma grande quantidade de ar, são "sugados" devido à diferença de pressão gerada pelo jato d'água em alta velocidade (efeito "tubo de Venturi"). As partículas de abrasivo são, então, aceleradas pelo jato d'água de alta velocidade, atingindo o material. A figura 2 ilustra o processo.

O sistema de jato abrasivo de suspensão gera um jato dito bifásico, pois compõe-se somente de água e abrasivo. Já o sistema de jato d'água abrasivo gera um jato trifásico, composto por água, abrasivo e ar. Esta é uma importante diferença, pois faz com que, devido à presença do ar, o jato d'água abrasivo não possa ser utilizado em atmosferas inflamáveis ou na presença de combustíveis. Desempenho e aplicações para os jatos abrasivos de suspensão em rochas ornamentais, além de comparações entre os dois sistemas empregados, podem ser encontrados em AGUS *et al.* (1995), juntamente com os resultados obtidos através da utilização de abrasivos diferentes.

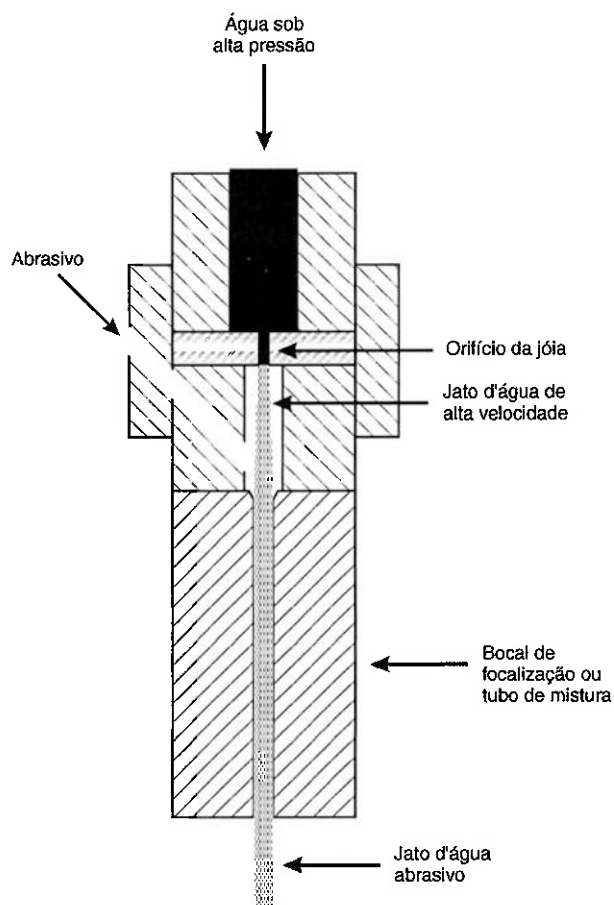


Figura 2 — Esquema de um cabeçote de jato d'água abrasivo.

Outro importante tipo de jato d'água é o jato de cavitação. O efeito destruidor das bolhas de cavitação (gás ou vapor) é conhecido há mais de um século (VIJAY, 1999). Este efeito é, geralmente, indesejável. Podemos citar, por exemplo, a formação de bolhas de cavitação nas hélices que impulsionam um navio. A cavitação, nesse caso, acelera o processo de fadiga do material. O jato d'água de cavitação tira proveito do efeito destruidor do processo de cavitação. KALUMUCK *et al.* (1993) apresentam noções sobre os mecanismos que regem os jatos submersos e o efeito destruidor da cavitação.

Utilizações para os jatos d'água de cavitação podem ser encontradas em vários setores. Na área da mineração, por exemplo, pode ser utilizado para perfuração de rochas (BARDIN; CHOLET, 1988 *apud* VIJAY *et al.*, 1993), para a fragmentação de carvão (CONN; RUDY, 1976 *apud* VIJAY *et al.*, 1993), para o corte de rochas (CHAHINE *et al.*, 1995). KALUMUCK *et al.* (1997) descrevem a importante utilização deste tipo de jato para a limpeza de cascos de navios, sem a remoção da pintura. A grande vantagem neste tipo de aplicação reside no fato de que a remoção dos detritos indesejáveis pode ser executada em áreas submersas da embarcação.

Outro jato utilizado no processo de limpeza, corte e fragmentação de materiais é o denominado jato pulsante. Este tipo de jato é composto de vários pulsos seqüenciais de alta velocidade. Quando estes pulsos impactam o material alvo, as pressões nos pontos de impacto estão altamente localizadas. A fadiga provocada por estas pressões rompe o material com uma velocidade maior, se compararmos com o processo de

jato contínuo. Uma descrição dos vários métodos utilizados para gerar os pulsos pode ser encontrada em VIJAY (1999). ATANOV; GESKIN (1997) descrevem os mecanismos que atuam na interação entre esse tipo de jato e o material alvo.

As aplicações são as mesmas do jato d'água puro, com a limitação de não poder executar cortes de precisão (VIJAY, 1999). Na área da mineração, ATANOV (1991) apresenta os resultados de investigações sobre a utilização deste tipo de jato para a fragmentação de vários tipos de rochas. KOLLÉ (1993) descreve um equipamento gerador de pulsos, os princípios de funcionamento e também os resultados de aplicações para a fragmentação de rochas. ZHEN-FANG; CHUAN-LIN (1993) mostram os resultados de experimentos envolvendo o jato pulsante para a perfuração de poços de petróleo. VIJAY *et al.* (1997) mostram que o jato pulsante de baixa pressão (13 a 35 MPa) oferece excelente desempenho para a remoção de camadas de tinta de diversos materiais.

Embora não utilizem água como meio fluido, os jatos de ar, puros ou com abrasivo, e os jatos criogênicos merecem algum destaque.

Os jatos de ar abrasivos possuem algumas aplicações específicas. Uma delas é a limpeza de superfícies. Na cidade de São Paulo, unidades móveis, utilizando compressores de ar e abrasivo (areia), executam a limpeza das placas sinalizadoras de trânsito através do jateamento das partículas de areia, a alta velocidade, contra a superfície das placas.

Os jatos criogênicos, ou jatos de gás liquefeito, possuem a vantagem de eliminar o líquido residual, visto que os fluidos utilizados

(ar, CO₂ ou N₂) são gases à pressão e temperatura ambientes. VIJAY (1999) mostra um diagrama esquemático para geração de um jato de CO₂.

Em resumo, os principais tipos de jatos fluídos de alta pressão são os seguintes:

- jatos d'água puros ou plenos;
- jatos d'água abrasivos;
- jatos d'água de cavitação;
- jatos d'água pulsantes;
- jatos de ar abrasivos;
- jatos criogênicos.

Dentre os expostos, o jato d'água abrasivo é o processo mais utilizado para o corte da maioria dos materiais, e é nele que será focado o presente estudo.

3.2 Abrasivos

O tipo de material utilizado como abrasivo no sistema de corte por jato d'água afeta diretamente a eficiência do processo. OHMAN (1993) afirma que cada abrasivo possui determinadas características que determinam sua eficiência no processo de corte. Afirma, ainda, que

as características que influenciam a eficiência do corte são: dureza, densidade, formato da partícula, grau de pureza e granulometria.

MORT (1995) mostra os resultados de um levantamento realizado em outubro de 1994 entre os usuários de equipamentos de jatos d'água abrasivos, o qual mostrou que 86% dos usuários utilizavam a granada como abrasivo. Este grupo de minerais apresenta características ótimas para essa utilização. CORTES *et al.* (2000) determinaram, experimentalmente, as características de alguns materiais (granadas, óxido de alumínio e carbeto de silício) que podem ser utilizados como abrasivos no processo de corte. VASEK *et al.* (1993) mostraram a influência que as propriedades mineralógicas de vários grupos de granadas (almandina, almandita, espessartita, piropo, grossulária e andradita) exercem no processo de corte de vários materiais, inclusive granito. Os autores obtiveram diferenças muito grandes (acima de valores estimados) na profundidade de corte dos materiais ensaiados, quando utilizados grupos de granadas diferentes. Atribuíram esse comportamento inesperado a defeitos nos grãos do abrasivo, zonas de deformação plástica e não homogeneidade dos grãos. Afirmaram que, para obter uma melhor eficiência de corte, é necessária a eliminação de todas as influências desfavoráveis para a estabilidade das partículas de abrasivo.

Uma propriedade importante do abrasivo que deve ser levada em consideração é a sua dureza. A granada possui dureza de 6,5 a 7,5 na escala Mohs. O óxido de alumínio possui dureza 9, aproximadamente. O carbeto de silício, maior que 9. Quanto maior a dureza do abrasivo,

maior será o desgaste do tubo de mistura do equipamento, diminuindo, em alguns casos drasticamente, a sua vida útil. NESS; ZIBBELL (1996) estudaram a abrasão e a erosão em materiais de alta dureza, como o carbetto de tungstênio e o carbetto de boro, utilizados para a confecção dos tubos de mistura nos bocais do equipamento gerador do jato d'água abrasivo. TAGGART *et al.* (1997), através de métodos de desgaste acelerado, mostraram que o tubo de mistura se desgasta muito rapidamente quando o material abrasivo utilizado é o óxido de alumínio, em comparação com o desgaste provocado pela granada. Por outro lado, AGUS *et al.* (1995) afirmam que abrasivos de maior dureza são muito mais eficientes no corte de rochas. Mostraram que o granito, quando submetido ao processo de corte, é muito mais sensível às variações das propriedades do abrasivo que o mármore.

Outro fator muito importante é o custo do abrasivo. O Apêndice A desta dissertação mostra que, no Brasil, o abrasivo representa mais de 50% do custo operacional do processo. Com o objetivo de diminuir esta parcela, CORTES *et al.* (2000) mostram a possibilidade de aproveitamento de uma granada brasileira, obtida através do processamento de rejeitos da mineração de areia monazítica. Talvez esta seja uma solução para a redução dos custos operacionais do processo de corte por jato d'água.

AGUS *et al.* (1994) investigaram a influência de vários materiais abrasivos (granada, areia, granalha e escória metálica, olivina e óxido de alumínio) no corte de granito. De todos os materiais experimentados, o óxido de alumínio apresentou a melhor eficiência de corte. Um dos

materiais testados foi a granalha metálica, muito utilizada em teares para corte dos blocos de rocha ornamental. Os autores constataram que a granalha é menos eficiente que a granada para o corte de granito.

LI *et al.* (1995) mostraram a possibilidade de emprego do gelo como abrasivo. Apresentaram, inclusive, um diagrama do processo e os resultados obtidos em laboratório. Concluíram que, devido à baixa velocidade do jato e ao formato irregular das partículas de gelo, o poder de remoção de material é bastante reduzido. Os autores pretendem melhorar o projeto e dar continuidade aos experimentos.

3.3 Mecanismos de Remoção do Material

No processo de corte por jato d'água abrasivo, a remoção de material ocorre devido a duas ações: primeira, o impacto, contra o material alvo, de partículas de abrasivo dotadas de grande velocidade e, portanto, de alta energia cinética; segunda, a erosão provocada pela água. Esta desempenha um papel importantíssimo na remoção do material. Devemos lembrar que, embora seja fluida, está dotada de grande velocidade, sendo grande o seu poder de erosão. HASHISH (1984) *apud* MOMBER; KOVACEVIC (1998) afirma que a água tem um papel muito importante na remoção de materiais friáveis, caso das rochas. Já no caso de materiais maleáveis (metais), a principal função da água está no processo de aceleração das partículas de abrasivo. Uma

ampla faixa de materiais metálicos que não podem ser cortados pelos jatos de água puro comprovam esta hipótese.

A velocidade do jato d'água na saída do bocal (v_A) pode ser calculada através da equação de Bernoulli:

$$v_A = \sqrt{\frac{2p}{\rho_w}}, \quad (1)$$

onde p é a pressão da bomba e ρ_w é a densidade da água.

Conhecendo-se o diâmetro do orifício da jóia, o fluxo de água pode ser determinado através da equação:

$$Q_w = \frac{\pi}{4} \times d_0^2 \times \sqrt{\frac{2p}{\rho_w}}, \quad (2)$$

onde d_0 é o diâmetro do orifício, p é a pressão da bomba e ρ_w é a densidade da água.

Tratando-se de velocidades elevadas e, também, de elevados números de Reynolds, as perdas não são pequenas e devem, obviamente, ser levadas em consideração. Para tal, devem ser introduzidos, nas equações 1 e 2, coeficientes de perda:

$$v_A = C_v \times \sqrt{\frac{2p}{\rho_w}} \quad (3)$$

e

$$Q_w = C_d \times \frac{\pi}{4} \times d_0^2 \times \sqrt{\frac{2p}{\rho_w}}, \quad (4)$$

onde C_v e C_d são, respectivamente, o coeficiente de velocidade e o coeficiente de descarga. HASHISH (1993) afirma que, para esses coeficientes, os valores típicos são 0,98 e 0,7, respectivamente.

Segundo o mesmo autor, a velocidade v_p de uma partícula do abrasivo pode ser determinada a partir da seguinte equação:

$$v_p = \eta \times \frac{v_A}{1 + \left(\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_w} \right)}, \quad (5)$$

onde v_A é a velocidade do jato determinada a partir da equação 3, \dot{m}_A é o fluxo de massa de abrasivo (maiores detalhes podem ser encontrados no capítulo 5), \dot{m}_w é o fluxo de massa de água e η é a eficiência de transferência de momento, e seu valor é aproximadamente 80%, ou 0,8 (HASHISH, 1993).

A equação 5, embora seja um meio aproximado de determinar a velocidade das partículas de abrasivo, é um bom ponto de partida. De posse da velocidade e da massa da partícula, além de outras características, podemos estudar, ou quantificar, o impacto da mesma contra o material alvo.

MENG; LUDEMA (1995) *apud* MOMBER; KOVACEVIC (1998) definiram quatro mecanismos pelos quais partículas sólidas separam material da superfície do alvo. Estes mecanismos são corte, fadiga, fusão e fratura frágil (vide figura 3). Tais mecanismos não agem separadamente, e sua importância em um processo de erosão particular depende de vários fatores, tais como ângulo de impacto da partícula de abrasivo, sua energia cinética, seu formato, além das propriedades do material alvo.

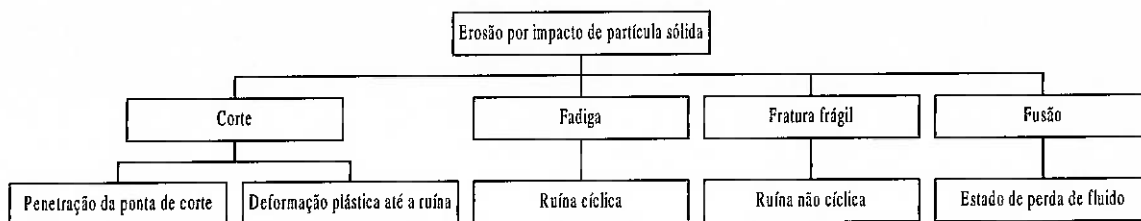


Figura 3 — Mecanismos de remoção de material por erosão de partícula sólida.

Fonte: MENG; LUDEMA (1995) *apud* MOMBER; KOVACEVIC (1998).

O processo de erosão de partículas sólidas é geralmente caracterizado por um parâmetro adimensional chamado número de erosão, E_N . Este número é definido pela equação 6 a seguir:

$$E_N = \frac{m_M}{m_P}, \quad (6)$$

onde m_M é a massa do material removido e m_P é a massa da partícula abrasiva.

Portanto, o volume de material removido por partícula de abrasivo é:

$$V_M = \frac{E_N \times m_P}{\rho_M}, \quad (7)$$

onde ρ_M é a densidade do material alvo.

É importante que se faça uma distinção entre dois grupos distintos de materiais: materiais maleáveis e materiais friáveis. Esta classificação é perfeitamente aplicável no processo de corte ou remoção de material através do jato d'água abrasivo, pois as duas categorias

apresentam comportamento distinto quando submetidas ao dito processo. Na categoria de materiais maleáveis encontram-se os metais. AROLA; RAMULU (1997) estudaram a influência dos parâmetros de corte e as propriedades dos materiais maleáveis nos campos de fadigas residuais resultantes do processo de corte por jato d'água abrasivo.

As rochas e as cerâmicas são classificadas como materiais frágeis. Os modelos de erosão dessa classe de materiais está relativamente bem estabelecido. Segundo MOMBER; KOVACEVIC (1998), a equação geral para o volume de material removido, na categoria de materiais frágeis, especialmente cerâmicas, devido ao impacto de uma partícula de abrasivo, é:

$$V_M = \frac{\pi}{4} \times (2 \times c_L)^2 \times h_{Cr} = \pi \times c_L^2 \times h_{Cr}, \quad (8)$$

onde c_L é o comprimento do rompimento radial e h_{Cr} é a profundidade do rompimento radial.

A figura 4, a seguir, ilustra o processo. A equação 8 pode ser resolvida através das relações entre a geometria de formação das rupturas e os principais parâmetros do processo de erosão.

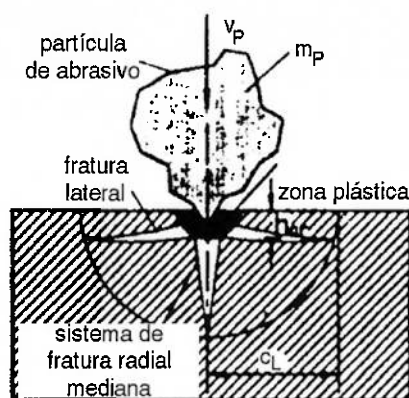


Figura 4 — Características de remoção de material por partícula sólida.

Fonte: BUIJS (1994) *apud* MOMBER; KOVACEVIC (1998).

A respeito do mecanismo de ruptura em materiais cerâmicos, EVANS *et. al.* (1978) *apud* ABDEL-RAHMAN; EL-DOMIATY (1998) descrevem teoricamente a formação de fraturas laterais. A teoria considera a profundidade na qual a fratura lateral se forma e também a sua dimensão. Os autores partiram do princípio de que a profundidade da fratura é proporcional à profundidade da zona plástica, quando ocorre a completa penetração da partícula de impacto. A quantidade de material removido depende das características do próprio material alvo (resistência à erosão, dureza, densidade, etc.) e das características da partícula, no caso o abrasivo (velocidade, densidade, tamanho, etc.).

ZENG; KIM (1996), concordando com RAMULU (1993) *apud* MOMBER; KOVACEVIC (1998), atribuem a remoção do material frágil a dois processos distintos: impacto imediato e formação de uma rede de ruptura nas vizinhanças do local deste impacto, como ilustrado na figura 5.

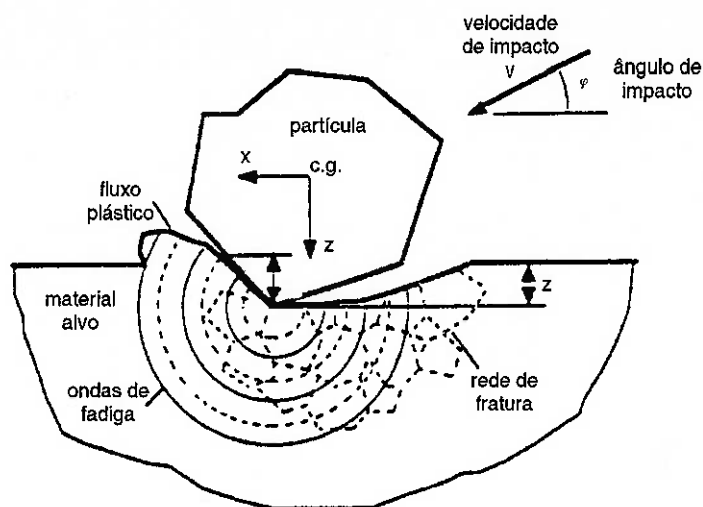


Figura 5 — Os dois processos de remoção do material: impacto e rede de rompimento.

Fonte: ZENG; KIM (1996).

KAHLMANN (1993) *apud* MOMBER; KOVACEVIC (1998) fez uma suposição a respeito da origem dessas redes de fratura. O autor encontrou manchas de granada fundida na superfície de materiais cerâmicos cortados por jato d'água abrasivo. Estas manchas de granada, que seguem a direção do fluxo do jato, apresentam pequenos orifícios, com diâmetro menor que um milímetro. Ele atribuiu a origem destes orifícios a um fenômeno chamado "microcozimento". Como a granada se funde a 1.280 °C, foram identificados pontos localizados de alta temperatura, gerados pelo atrito entre as partículas de abrasivo e a superfície de corte do material alvo. Estes pontos seriam imediatamente resfriados pela água presente no jato. Esta súbita diferença de temperatura poderia ser a causa das fraturas responsáveis pela remoção do material.

ZENG; KIM (1992) *apud* MOMBER; KOVACEVIC (1998) conduziram um extenso estudo através da técnica de microscopia eletrônica de varredura sobre o comportamento de cerâmicas policristalinas. Através de experimentos de varredura, corte e abertura de sulcos, utilizando ângulos de impacto perpendicular e rasante (20°), os autores citados identificaram dois processos de remoção de material, a saber: fratura da rocha e deformação plástica. Para pequenos ângulos de impacto, indicaram a presença de riscos devido a grãos de abrasivos, como também poucas fraturas intergranulares. Por outro lado, as fraturas intergranulares dominam o processo de remoção de material utilizando um ângulo de impacto perpendicular. Sob essas condições, foi observado que alguns grãos do material alvo sofreram um aumento de densidade, indicando a ocorrência de deformações plásticas.

Através destas observações, e partindo do princípio de que a “frente de corte” pode ser caracterizada por uma parábola, ZENG *et al.* (1992) deduziram uma equação que tenta prever, através das características do material alvo e dos parâmetros do processo, a profundidade de corte h a ser obtida no processo de corte:

$$h = \left(\frac{\eta \times C_v \times C_y}{1 + R} \right)^2 \times \frac{C_m \times p}{\rho_w \times d_f} \times \left(\frac{f_w \times \beta \times d_p \times \sigma_f \times \phi^2}{3 \times \gamma \times E} + \frac{\phi}{\sigma_f} \right) \quad (9)$$

Nesta equação, η é a transferência de momento da partícula de abrasivo, definida por HASHISH (1993) como sendo 0,8. C_v e C_y são coeficientes relacionados às perdas do jato d’água sob pressão: C_v é o coeficiente de velocidade e C_y é o coeficiente de compressibilidade. C_m é a fração efetiva de partículas de abrasivo que contribuíram no processo.

f_w é a fração de energia efetivamente utilizada para a fadiga do material. σ_f é a perda no fluxo do jato d'água abrasivo. ZENG *et al.* (1992) não especificaram valores para estas variáveis. R é a razão entre o fluxo de abrasivo e de água, em massa. p é a pressão hidráulica. ρ_w é a densidade da água. d_f é o diâmetro do bocal. β é uma função do coeficiente de Poisson do material alvo e E é o módulo de elasticidade. γ é a energia de fratura.

O segundo parênteses da equação 9 relaciona as propriedades do material alvo. Os autores definiram, então, a "resistência à erosão" (R_e) do material:

$$R_e = \frac{1}{\left(\frac{f_w \times \beta \times d_p \times \sigma_f \times \varphi^2}{3 \times \gamma \times E} + \frac{\varphi}{\sigma_f} \right)} \quad (10)$$

O inverso da resistência à erosão foi definido como **número de maquinalidade**^{*} do material, e representa o comportamento do mesmo quando submetido ao corte por jato d'água abrasivo.

ZENG *et al.* (1992) afirmaram que a equação 9 não é suficientemente precisa para aplicações práticas. Deduziram, experimentalmente, a equação 11, que relaciona a profundidade de corte h com diversos parâmetros de corte:

$$h = \frac{N_m \times p^{1,25} \times \dot{m}_A^{0,343} \times Q_W^{0,687}}{C \times v^{0,866} \times d_F^{0,618}} \quad (11)$$

^{*} A expressão "número de maquinalidade" é a melhor tradução para a expressão em inglês "machinability number".

Nesta equação, as características do material estão representadas pelo número de maquinabilidade N_m . p é pressão hidráulica; \dot{m}_A é o fluxo de massa do abrasivo; Q_w é o fluxo de água (volume); v é a velocidade do bocal e d_f é o diâmetro de foco. Todos estes parâmetros do processo estão explanados no capítulo 5 desta dissertação.

A constante C (equação 11) merece especial atenção. Como o número de maquinabilidade N_m é adimensional, o valor de C varia de acordo com o sistema de unidades adotado. No sistema métrico (profundidade de corte e diâmetro de foco em milímetros, velocidade do bocal em milímetros por segundo, pressão hidráulica em mega Pascals, fluxo de água em litros por minuto, fluxo de massa de abrasivo em gramas por segundo) o valor de C é 8.800.

Na equação 11, os parâmetros são expressos em potências. Podemos notar, através de sua potência, a influência que cada parâmetro exerce sobre a profundidade do corte. Parâmetros no divisor da fração exercem uma influência positiva na profundidade do corte. Sua potência indica o grau de atuação positivo na profundidade do corte. Por outro lado, os parâmetros que se encontram no denominador da fração indicam uma influência negativa na profundidade do corte.

Visualizando-se a equação 11, podemos notar que o número de maquinabilidade (N_m) representa uma influência positiva na profundidade de corte, ou seja, quanto maior o número de maquinabilidade do material, maior a “facilidade” com que ele se deixa cortar pelo jato d’água abrasivo, ou menor a resistência que o material oferece ao impacto do jato.

Com o objetivo de criar um banco de dados contendo o número de maquinaalidade dos materiais mais comumente utilizados na indústria, ZENG *et. al* (1992) selecionaram diversos materiais e submeteram-nos a vários ensaios de corte através do jato d'água abrasivo. Cada material foi ensaiado três vezes, variando-se vários parâmetros de corte. Para a obtenção do número de maquinaalidade, utilizaram a equação 12, a seguir, que nada mais é que a equação 11 com o termo N_m isolado no primeiro membro:

$$N_m = \frac{C \times h \times d_F^{0,618} \times v^{0,866}}{p^{1,25} \times Q_W^{0,687} \times \dot{m}_A^{0,343}} \quad (12)$$

O número de maquinaalidade, segundo os autores citados, variou $\pm 10\%$ em 61% dos dados, e $\pm 20\%$ em 90% dos dados obtidos. Estes erros ocorreram devido à falta de uma padronização dos parâmetros de teste. Cada fabricante de equipamento de corte por jato d'água abrasivo utiliza valores diferentes para cada parâmetro do processo, e cada um desses parâmetros influi de maneira diferentes na profundidade de corte obtida. Mesmo assim, os valores obtidos por ZENG *et. al.* (1992) foram tomados como padrão por alguns fabricantes de equipamentos. A tabela 1, a seguir, apresenta estes valores.

Tabela 1 — Número de maquinabilidade dos materiais mais utilizados na indústria.

Fonte: ZENG *et al.*, 1992.

Material	Número de maquinabilidade
Aço ASTM 34	87,6
Aço inoxidável 304	115
Alumínio AL 6061-T6	213
Bauxita refratária	106
Carbeto de silício	12,6
Cerâmica AD 85	17,3
Cerâmica AD 90	10,3
Cerâmica AD 94	17,3
Cerâmica AD 99.5	13,1
Cerâmica AD 99.9	1,6
Cobre	110
Concreto (resistência média)	516
Concreto (resistência alta)	468
Concreto asfáltico	461
Ferro	121
Grafite	875
Granito	322
Madeira (pinho)	2.637
Mármore	535
Náilon	538
Polipropileno	985
Titânio	115
Vidro	596

3.4 Acabamento das superfícies

O acabamento da superfície de corte produzida por métodos convencionais de corte é, geralmente, uniforme. Em se tratando de rochas ornamentais, podemos citar o exemplo da serra diamantada, um dos métodos convencionais mais utilizados para o corte de chapas de mármore e granito. O acabamento de uma superfície cortada por este método pode ser caracterizado medindo-se a rugosidade em qualquer parte desta superfície. Já as superfícies cortadas através do método de jato d'água abrasivo não apresentam um acabamento uniforme. Este varia não só com os diferentes parâmetros de corte utilizados, mas, principalmente, com a espessura do material.

A Figura 6 apresenta a superfície de uma amostra de mármore Branco Campos do Jordão cortada por jato d'água abrasivo. A amostra foi coberta com uma fina camada de grafite, para melhor observação das irregularidades.



Figura 6 — Superfície de mármore Branco Campos do Jordão cortada através do processo de jato d'água abrasivo.

Como pode ser observado através da figura, a superfície de corte apresenta duas regiões de acabamento distinto. A região superior é chamada “região de corte liso” e a inferior “região de corte rugoso”. Esta última é marcada pela presença de estrias ou ondulações, cuja origem ainda não está bem definida. Quanto maior a velocidade do bocal, maior será a altura da região de corte rugoso e, conseqüentemente, maior será a altura dessas estrias. HASHISH (1988) *apud* HASHISH (1999) afirma que a formação dessas estrias está ligada à geometria do jato. À medida que este penetra no material, o seu diâmetro efetivo se torna menor, devido ao atrito com as paredes do material, ocorrendo uma redução na energia de impacto do abrasivo, devido à deflexão e ao ricochetear do próprio jato. Segundo o autor, esta redução no diâmetro do jato, juntamente com instabilidades do mesmo, são fatores decisivos para a formação das estrias. CHAO; GESKIN (1993) discordam. Segundo eles, a presença de estrias, ou ondulações, é um fenômeno típico dos processos de corte através de feixes de alta energia (laser, plasma, etc.), e sua formação está ligada a instabilidades do sistema, e não apenas do jato. As vibrações do bocal e do sistema de movimentação do mesmo contribuem, segundo os autores, para a formação das estrias. Por outro lado, NIU *et al.* (1997) concluíram que as estrias se formam devido a fenômenos que ocorrem em regiões próximas ao início do corte, ou seja, na região de corte liso.

KIM; LABUS (1999) afirmam que a região de corte liso é formada devido ao pequeno ângulo de impacto das partículas de abrasivo em relação ao plano da superfície que está sendo cortada. A região de corte

rugoso é formada devido ao impacto de partículas de abrasivo em ângulos maiores de incidência. Os mesmos autores também afirmam que existe uma variação de acabamento da superfície de corte em relação ao abrasivo utilizado. HASHISH (1992) *apud* KIM; LABUS (1999) constatou uma variação no acabamento da superfície com a variação do fluxo de massa do abrasivo. Aliás, segundo (KIM; LABUS, 1999), o fluxo de massa de abrasivo é um dos parâmetros de maior influência no acabamento das superfícies.

ZENG *et al.* (1992) introduziram o conceito de nível de qualidade de corte. O nível de qualidade de corte q (adimensional) foi introduzido no denominador do segundo membro da equação 12. Isolando a velocidade do bocal (v) no primeiro membro da citada equação, tem-se:

$$v = \left(\frac{N_m \times p^{1,25} \times Q_w^{0,687} \times \dot{m}_A^{0,343}}{C \times q \times h \times d_F^{0,618}} \right)^{1,15}, \quad (13)$$

onde q é o nível de qualidade de corte.

A tabela a seguir descreve as superfícies cortadas em cinco diferentes valores de q :

Tabela 2 — Descrição das superfícies de corte em relação às variações de q .

Fonte: ZENG *et al.* (1992).

Nível de qualidade de corte (q)	Descrição da superfície
1	Utilizado apenas para romper o material. Geralmente utiliza-se um valor de q maior que 1,2.
2	Superfície apresentando acabamento rugoso, com estrias a partir da metade inferior.
3	Transição liso/rugoso. Aparecem algumas estrias.
4	Não apresenta estrias na maioria dos materiais.
5	Superfície de corte bastante lisa.

É importante notar que quanto maior o valor de q , isto é, quanto melhor for a qualidade da superfície, menor será a velocidade de corte. Conseqüentemente, o corte tomará mais tempo e exigirá um maior consumo de abrasivo, água e energia elétrica, além de provocar um maior desgaste no equipamento. Todos estes fatores provocam um aumento no custo operacional do processo.

O capítulo 7 da presente dissertação mostra uma série de fotomicrografias, obtidas através de microscópio eletrônico de varredura, de superfícies cortadas por jato d'água abrasivo, tanto da região de corte liso como da região de corte rugoso.

3.5 Aspectos Ambientais

Uma das inúmeras vantagens do processo de corte por jato d'água abrasivo é o fato deste não gerar poluição atmosférica. Tanto o abrasivo como o material removido são misturados com a água utilizada para a geração do jato e depositados em um tanque. LOUIS *et al.* (1995) estudaram estes detritos e verificaram que sua sedimentação é rápida. Os autores citados executaram ensaios para permitir a separação do abrasivo e do material contaminante. Também analisaram a granulometria e o formato das partículas de abrasivo na saída do processo. Essas verificações contribuem no estudo e projeto de sistemas de reciclagem do abrasivo, além de permitir uma melhor compreensão do mecanismo de remoção de material no processo de corte por jato d'água abrasivo.

O abrasivo, depois de utilizado, apresenta características bem diferentes em relação ao abrasivo virgem, principalmente no que diz respeito à granulometria. Pode ser reaproveitado, com o sacrifício de sua eficiência (HASHISH, 1997).

A água utilizada no processo pode, também, ser reciclada. Existem filtros de remoção de partículas sólidas projetados especificamente para aplicação em equipamentos de geração de jatos d'água abrasivos. Estes filtros são capazes de reter partículas de 0,05 μm (BURNHAM; SEPE, 1993).

Com relação à poluição sonora, o processo de corte por jato d'água produz um nível considerável de ruído. Segundo KATAKURA;

MIYAMOTO (1997), o ruído é gerado por diversas fontes, como a bomba d'água, o motor (principalmente se for movido a óleo diesel, em unidades móveis), a ruptura do material alvo, o impacto da água no material alvo e o fenômeno da cavitação. No caso de jatos d'água abrasivos, uma outra fonte de ruído a ser considerada é o impacto do abrasivo, dotado de grande velocidade, contra o material alvo. Todos esses fatores contribuem na constituição de um ambiente com nível de ruído relativamente alto.

Entretanto, é possível uma drástica redução destes níveis através da operação submersa do bocal e material alvo. Neste caso, o processo transmite um nível muito mais baixo de ruído para o ambiente, não havendo nenhuma modificação no desempenho do equipamento.

4. Seleção das Rochas Ornamentais

Com o objetivo de testar o comportamento do novo sistema de jato abrasivo para o corte de diferentes tipos de rochas ornamentais brasileiras comercialmente utilizadas como revestimento em construção civil, três granitos e um mármore, todos provenientes do Estado de São Paulo, foram selecionados como materiais a serem ensaiados. Além disso, duas dessas amostras foram submetidas a diferentes processos de corte, e suas superfícies fotografadas através da microscopia eletrônica de varredura com o objetivo de verificar seus diferentes aspectos.

Além de testar os materiais submetidos ao corte, o experimento também mostrou a importância do material utilizado como abrasivo no equipamento: granada, granulometria 80 malhas, procedente da Índia. A granada é um abrasivo natural, e é utilizada por 85% dos usuários do processo no mundo (MOMBER; KOVACEVIC, 1998). Não existe, atualmente, fornecedor nacional deste material. Outros materiais, como o óxido de alumínio e o carbetto de silício (ambos sintéticos e de fabricação nacional), foram tentados, mas sem sucesso. Embora estes materiais tenham desempenho comprovado (AGUS *et al.*, 1995), provocaram obstrução do bocal de saída do jato, talvez por

apresentarem uma distribuição granulométrica inadequada para utilização no processo em questão.

Expedições científicas para coleta de amostras foram os primeiros trabalhos realizados. A seguir estas amostras foram transformadas em corpos de prova apropriados na seção de preparo, com auxílio de serras diamantadas. A fase seguinte foi o teste dos corpos de prova no sistema com diferentes velocidades de corte.

Finalmente, os resultados dos testes e algumas conclusões gerais sobre os parâmetros tecnológicos para a otimização do sistema de jato abrasivo foram estabelecidas e são descritas nos capítulos seguintes.

4.1 As Amostras de Rochas Ornamentais

A figura 7 mostra a localização das pedreiras no estado de São Paulo.

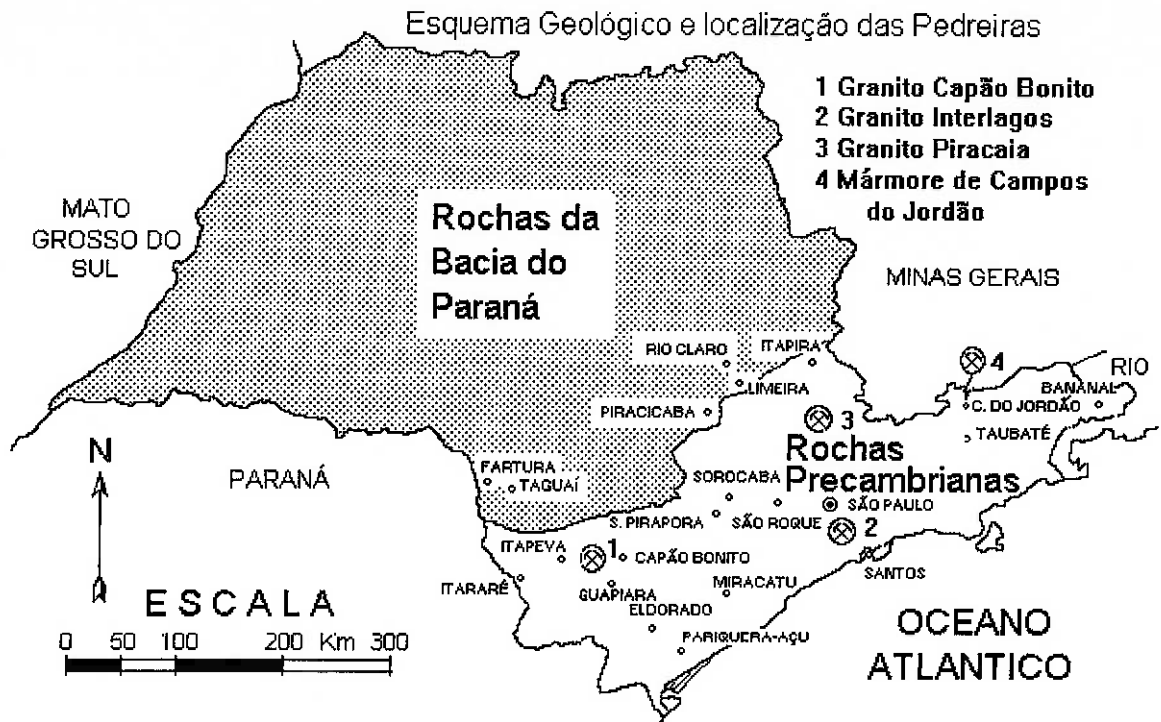


Figura 7 — Localização das pedreiras de rochas ornamentais coletadas.

Os três tipos de granito selecionados foram o valioso granito Vermelho Capão Bonito, o granito Prata Interlagos e o granito Preto Piracaia. A seqüência de extração dos blocos do granito Vermelho Capão Bonito com auxílio de jato de chama foi pormenorizadamente descrito em trabalho apresentado em evento internacional na Ucrânia (HENNIES *et al.*, 1999).

Os outros dois tipos são o Prata Interlagos, explorado em Parelheiros, no sul do município de São Paulo, e o Preto Piracaia, explorado no município de Piracaia, ao norte da capital. O granito Preto Piracaia é principalmente usado para artes funerárias, tais como lápides de túmulos em cemitérios, e em alguns casos como fachadas de

prédios. Este último caso de aplicação merece um destaque para o histórico de rochas ornamentais do estado de São Paulo, e foi descoberto durante expedição científica para coleta de amostras do granito.

A figura 8, tomada a partir de uma fotografia em uma das paredes dos escritórios da serraria Irmãos Fiorelini, em Piracaia, mostra um bloco de rocha de dez metros de comprimento, um metro e sessenta centímetros de largura e sessenta centímetros de espessura, extraído em 1938, pesando cerca de sessenta toneladas e transportado em estrutura de vigas de aço com formato de "I", com rodas também de aço, puxado com carro de boi. A fotografia original foi tomada nas imediações da cidade, durante a travessia de um córrego.



Figura 8 — Bloco de granito Preto Piracaia extraído em 1938 e sua estrutura de transporte.

Este bloco foi transportado para São Paulo na mesma ocasião e, após ser aparado, foi utilizado na fachada do prédio da atual Secretaria de Esportes e Turismo, localizado na Praça Antonio Prado, em frente à Bolsa de Valores e ao lado do prédio do Banespa. A figura 9 mostra uma composição de fotos desta fachada.



Figura 9 — Fachada do prédio que hoje abriga a Secretaria dos Negócios de Esporte e Turismo, em São Paulo.

Os granitos são de idade Precambriana e pertencem ao escudo de rochas cristalinas do Brasil.

Finalmente, o mármore Branco Campos do Jordão é um mármore dolomítico branco, parcialmente explorado como pedra ornamental,

outra parcela como rocha ornamental e finalmente outras duas parcelas são comercializadas como corretivo de solo, ou como elemento na produção de cimento branco, sendo nestas duas alternativas moído e finamente pulverizado. Este mármore branco é encontrado em camada encaixada em migmatitos precambrianos que ocorrem próximos da cidade de Campos do Jordão, no bairro dos Marmelos, na serra da Mantiqueira, Estado de São Paulo.

4.2 Características Tecnológicas das Rochas

As Tabelas 3, 4, 5 e 6 apresentam, respectivamente, algumas das características tecnológicas mais importantes do granito Vermelho Capão Bonito (HENNIES *et al.*, 1999), granito Prata Interlagos (BORN *et al.*, 1996), granito Preto Piracaia (CARUSO, 1990) e mármore Branco Campos do Jordão (CARUSO, 1990).

Tabela 3 — Características tecnológicas do granito Vermelho

Capão Bonito.

Fonte: HENNIES *et al.* (1999).

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

Tabela 4 — Características tecnológicas do granito Prata

Interlagos.

Fonte: BORN *et al.* (1996).

Massa Específica Aparente Seca	2.625 kg/m ³
Porosidade Aparente	0,78%
Absorção de Água	0,28%
Desgaste Amsler	0,64 mm
Compressão Uniaxial	179,0 MPa
Flexão	14,1 MPa

Tabela 5 — Características tecnológicas do granito Preto Piracaia.

Fonte: CARUSO (1990).

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

Tabela 6 — Características tecnológicas do mármore Branco

Campos do Jordão.

Fonte: CARUSO (1990).

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

5. Trabalhos de Laboratório

Neste capítulo estão descritos os experimentos realizados no Módulo de Jato d'água Abrasivo, localizado no Laboratório de Mecânica de Rochas, Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. LAUAND *et al.* (2000) fornecem uma descrição completa do módulo, as características do equipamento utilizado e mostra, também, uma série de fotografias do mesmo.

5.1 Preparação dos Corpos de Prova

As amostras de rocha ornamental foram, inicialmente, cortadas através de serra diamantada. Para a execução dos ensaios de corte retilíneo, utilizamos corpos de prova com o formato ilustrado na figura 10.

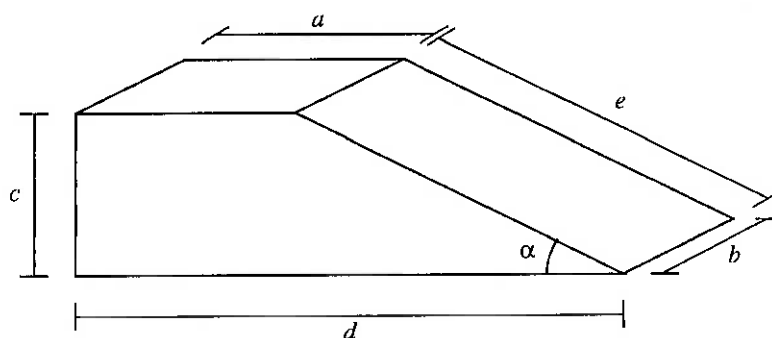


Figura 10 — Formato final dos corpos de prova.

O formato em cunha dos corpos de prova permite a análise do corte em qualquer profundidade. O motivo da utilização deste formato será explicado no decorrer deste capítulo.

As dimensões dos corpos de prova estão apresentadas na tabela 7.

Tabela 7 — Dimensões dos corpos de prova em milímetros.

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

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

$$\alpha = \text{atan} \left(\frac{c}{d - a} \right) \quad (14)$$

O valor e da rampa foi determinado pelo teorema de Pitágoras:

$$e = \sqrt{c^2 + (d - a)^2} \quad (15)$$

Para a execução dos ensaios curvilíneos, as amostras foram, inicialmente, cortadas através de serra diamantada, originando corpos

de prova em formato de paralelepípedo, com largura aproximada de 9 cm, comprimento de 15 cm e espessura em torno de 7 cm.

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

5.2 Explicação dos Parâmetros do Processo

O método de corte através do jato d'água abrasivo envolve uma série de parâmetros que determinam diretamente a eficiência, a economia e a qualidade do corte. Esses parâmetros foram divididos em quatro grupos: parâmetros hidráulicos, parâmetros de corte, parâmetros de mistura e aceleração e parâmetros do abrasivo. Na tabela 8 encontram-se os parâmetros e seus respectivos símbolos utilizados na presente dissertação.

Tabela 8 — Parâmetros do processo e simbologia.

		Símbolo
Parâmetros hidráulicos	Pressão da bomba	p
	Diâmetro do orifício da jóia	d_0
Parâmetros de corte	Velocidade do bocal	v
	Número de passos	n_p
	Distância de afastamento	x
	Ângulo de impacto	φ
Parâmetros de mistura e aceleração	Diâmetro de foco	d_f
	Comprimento do bocal	l_f
Parâmetros do abrasivo	Fluxo de massa	\dot{m}_A
	Diâmetro da partícula	d_p
	Distribuição granulométrica	$f(d_p)$
	Formato da partícula	
	Dureza	H_p

A figura 11 permite uma visualização desses parâmetros.

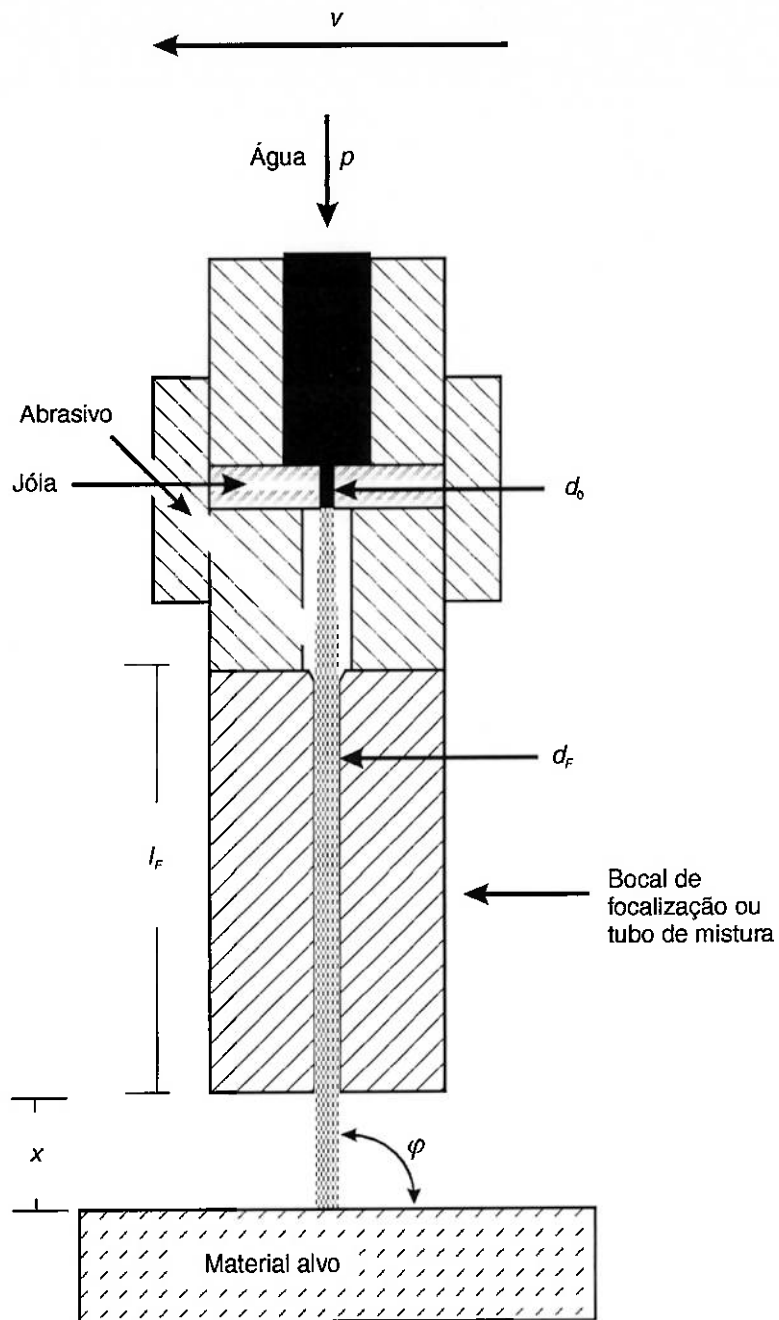


Figura 11 — Parâmetros do processo.

A seguir estão explanados todos os parâmetros que envolvem o processo de corte por jato d'água abrasivo.

- **Pressão da bomba (p)** — A pressão da bomba exerce influência direta sobre a eficiência de corte. Quanto maior o seu valor, maior será a velocidade do jato e, conseqüentemente, maior a profundidade de corte obtida. A pressão hidráulica no equipamento utilizado para o experimento é de 290 MPa. Este valor foi medido através de um manômetro localizado acima do bocal.
- **Diâmetro do orifício da jóia (d_j)** — O diâmetro do orifício da jóia determina o fluxo de água (Q_w), valor que influencia a eficiência e a profundidade de corte. Utilizou-se, durante o experimento, a mesma jóia, com valor nominal de 0,356 mm.
- **Número de passos (n_p)** — Todas as amostras foram submetidas ao corte apenas uma vez. Estamos estudando a possibilidade de alteração desse valor no equipamento utilizado, para que este seja também um parâmetro objeto de estudo.
- **Distância de afastamento (x)** — É a distância entre o orifício de saída do bocal e a amostra a ser cortada. O valor utilizado durante os experimentos foi 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. Para a

regulagem da distância de afastamento, utilizou-se uma chapa de metal com 3 mm de espessura, posicionada entre o bocal e o corpo de prova, logo antes de se iniciar o procedimento de corte. Com a chapa devidamente posicionada, abaixava-se o bocal até que este ficasse em contato com a chapa. Depois, levantava-se um pouco o bocal, apenas para permitir a retirada da chapa.

- **Ângulo de impacto (φ)** — Existem estudos (HASHISH, 1993 *apud* MOMBER; KOVACEVIC, 1998) analisando a qualidade e a eficiência do corte de acordo com a variação do ângulo de impacto. WADA; KUMON (1993) *apud* MOMBER; KOVACEVIC (1998) constataram que, em materiais friáveis, caso das rochas e cerâmicas, o ângulo de impacto que produz a maior profundidade de corte é o perpendicular ($\varphi = 90^\circ$). Este foi o valor utilizado no presente experimento.
- **Diâmetro de foco (d_p)** — Este valor corresponde, aproximadamente, ao valor nominal do diâmetro do bocal. Existe a possibilidade de variação deste valor, através da utilização de bocais de diferentes diâmetros. Durante o experimento, utilizou-se sempre o mesmo bocal, com diâmetro nominal de 0,762 mm.
- **Comprimento do foco (l_p)** — É o valor nominal do comprimento do bocal: 110 mm.

Parâmetros do abrasivo

O abrasivo utilizado durante todo o experimento foi o mineral natural granada, granulometria #80. O material foi importado da Índia pela empresa Flow Latino Americana Ltda. 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) podem ser encontrados em CORTES *et al.* (2000). Os autores citados também fornecem características de outros abrasivos que podem ser utilizados no processo.

O único parâmetro do abrasivo que depende do equipamento utilizado é o fluxo de massa (\dot{m}_A). Trata-se da quantidade em peso de abrasivo fornecido ao jato d'água em um determinado período de tempo. O processo de medição desse parâmetro está descrito em LAUAND (2000). Através deste processo, foi constatado que o valor do fluxo de massa do abrasivo utilizado é 5,5 g/s.

5.3 Ensaios

Os corpos de prova foram dispostos na máquina do modo ilustrado na figura 12, a seguir.

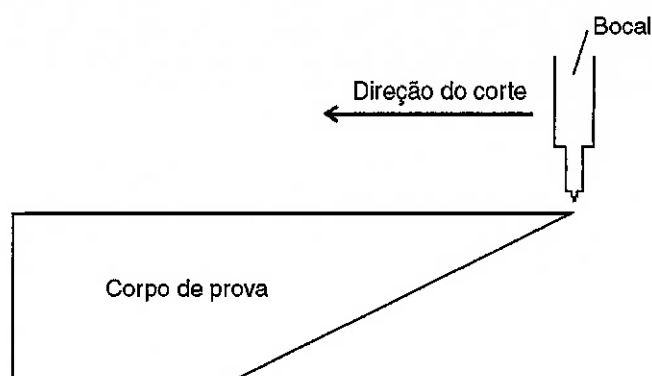


Figura 12 — Disposição dos corpos de prova para ensaio de corte retilíneo.

Podemos notar que o formato em cunha dos corpos de prova permite a análise do corte em qualquer profundidade do corpo de prova (ou até a profundidade máxima de corte).

Em cada corpo de prova foram executados cinco cortes retilíneos a diferentes velocidades do bocal, com uma distância de 1,5 cm entre as ranhuras. O comprimento de cada corte foi de 18 cm.

As velocidades de bocal adotadas foram sugeridas pelo próprio *software* de controle da máquina. Este *software* calcula a velocidade do bocal levando em consideração os parâmetros do processo, o número de maquinabilidade do material a ser cortado, a espessura do material e a qualidade de corte desejada, além da geometria do corte. Existe uma relação inversa entre a espessura do material e a velocidade do bocal que será utilizada:

$$v = \frac{1}{T^{1,15}}, \quad (15)$$

onde T é a espessura especificada do material a ser cortado.

A velocidade calculada pelo *software* e utilizada pela máquina pode variar durante o processo, dependendo da geometria do corte. O *software* diminui a velocidade do bocal antes de executar, por exemplo, uma curva. Esse processo é necessário para que a parte final do jato possa sempre acompanhar o seu início. A figura 13, a seguir, ilustra o atraso do jato no interior do material. Em cortes retilíneos não há variação de velocidade.

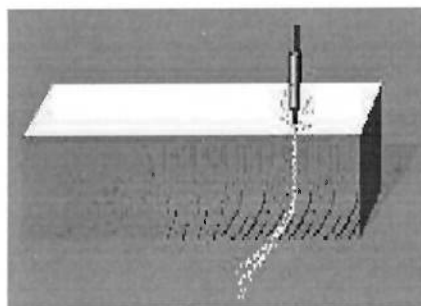


Figura 13 — Esquema ilustrando o atraso do jato no interior do material.

A velocidade do bocal varia, ainda, de acordo com a qualidade de corte desejada. Via de regra, quanto menor for a velocidade do bocal, maior será a qualidade, ou acabamento, da superfície do material alvo. No experimento de corte retilíneo, utilizamos cinco qualidades de corte diferentes. A tabela 9, a seguir, mostra as velocidades utilizadas para o corte dos corpos de prova.

Tabela 9 — Velocidades do bocal utilizadas no ensaio de corte retilíneo.

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

Notamos, através da tabela 9, que as velocidades adotadas para granito e mármore são diferentes. Por serem materiais diferentes, o número de maquinação, especificado e utilizado pelo *software* de cálculo, também é diferente. Para os granitos, foi especificado um número de maquinação de 322; para o mármore, 525 (valores determinados por ZENG *et al.*, 1992). A espessura especificada, tanto para o mármore quanto para o granito, foi de 50 mm, valor médio entre a espessura máxima de uma chapa comercial de rocha ornamental e a espessura aproximada dos corpos de prova ensaiados.

Além dos ensaios de corte retilíneo, foram executados quatro cortes circulares em cada um dos quatro materiais ensaiados. O objetivo deste procedimento foi a verificação da existência de conicidade nos cilindros obtidos, ou seja, diferença de dimensões existentes entre a parte superior (próxima do bocal de corte) e a parte inferior (saída do jato da amostra) deste círculos.

Cada corpo de prova foi submetido a quatro cortes circulares: dois cortes de círculos de mesma dimensão (diâmetro de 50 mm), mas com velocidades de cortes diferentes (qualidade 3 e 5) e dois cortes com círculos de dimensões menores (diâmetro de 25 mm), com diferentes velocidades de corte (qualidade 3 e 5).

A figura 14, abaixo, ilustra o desenho utilizado para esses cortes:

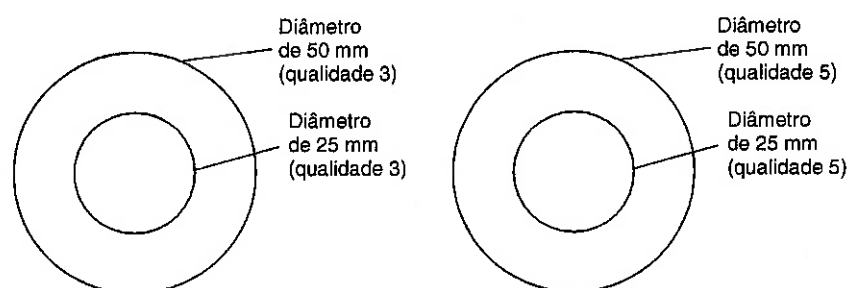


Figura 14 — Esboço dos cortes circulares.

As velocidades de corte ensaiadas variaram de acordo com a qualidade do corte (qualidade 3 ou 5), número de maquinagem do material, espessura e, também, de acordo com o diâmetro do círculo cortado. Esta variação ocorre devido ao processo de correção automática de velocidade do corte: quanto menor o raio de curvatura, menor será a velocidade para que, desta forma, possa ser mantida a qualidade de corte selecionada.

A tabela 10, a seguir, mostra os valores de velocidade do bocal utilizados para o corte circular de mármore (número de maquinagem 525, espessura especificada de 50 mm). A tabela 11 mostra os valores

de velocidade utilizados para o corte circular de granito (número de maquinabilidade 322, espessura especificada de 50 mm).

Tabela 10 — Velocidades de corte circular para mármore.

Diâmetro do círculo (mm)	Velocidade para qualidade 3 (mm/s)	Velocidade para qualidade 5 (mm/s)
25	1,36	0,27
50	2,04	0,50

Tabela 11 — Velocidades de corte circular para granitos.

Diâmetro do círculo (mm)	Velocidade para qualidade 3 (mm/s)	Velocidade para qualidade 5 (mm/s)
25	0,77	0,19
50	1,16	0,28

Os resultados do experimento, assim como a descrição do processo utilizado para a aferição dos materiais cortados, encontram-se no próximo capítulo da presente dissertação.

6. Resultados

Depois de submetidos ao processo de corte por jato d'água abrasivo, os corpos de prova foram examinados com a finalidade de obtenção de características relevantes que possam conduzir a otimizações do processo.

Para a análise dos corpos de prova resultantes do processo de corte retilíneo, digitalizaram-se ambas as superfícies de corte. As imagens obtidas, em tamanho natural, foram analisadas através de um *software* editor de imagens. As medições foram executadas diretamente no *software*. Os parâmetros geométricos de corte medidos estão apresentados no decorrer deste capítulo.

Cada cilindro resultante do processo de corte curvilíneo foi medido com a ajuda de um paquímetro, com o objetivo de obter valores para a determinação da sua conicidade.

6.1 Cortes Retilíneos

Antes de apresentar os valores resultantes do experimento, convém enumerar os parâmetros geométricos de corte medidos nos corpos de prova:

- **Largura no topo do corte (b_t) e largura na face inferior do corte (b_b):** A largura no topo do corte é a medida da ranhura do corte no plano superior do corpo de prova, ou seja, na superfície que recebeu diretamente o impacto do jato. A largura na face inferior do corte é, como o próprio nome indica, a largura do corte medida na parte inferior do corpo de prova, ou seja, na saída do jato. No caso do presente experimento, a medição deste valor foi executada através da digitalização da rampa (superfície inclinada) dos corpos de prova. O valor foi medido na posição da rampa que representa a altura de 50 mm de corte no corpo de prova (valor da espessura especificada). Estes dois valores (largura no topo do corte e largura na face inferior do corte) definem o afunilamento do corte (T_r). Seu valor foi obtido através do cociente da largura no topo do corte (b_t) e da largura na face inferior do corte (b_b). Durante todo o experimento, o valor de T_r se mostrou maior que a unidade, pois os valores de b_t sempre foram maiores que os de b_b . Este tipo de corte apresenta afunilamento convergente. Pode-se dizer que a largura do jato diminui na medida em que atravessa o corpo de prova.

A figura 15, a seguir, ilustra estes dois parâmetros em uma superfície cortada.

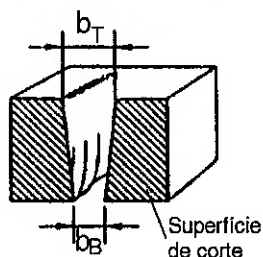


Figura 15 — Ilustração dos parâmetros b_T e b_B em uma superfície de corte.

- Altura do corte liso (h_{liso}) e altura do corte total (h): A superfície dos materiais cortados através de jato d'água abrasivo apresentam 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 (o processo de formação dessas estrias foi descrito no capítulo 3). A figura 16, a seguir, ilustra as duas alturas.

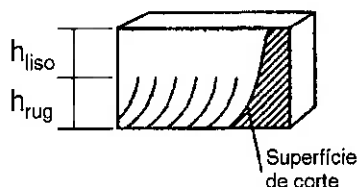


Figura 16 — Ilustração das alturas do corte liso e rugoso em uma superfície de corte.

Através da figura 16, podemos observar que a altura total de corte (h) consiste da soma $h_{\text{iso}} + h_{\text{rug}}$.

Para a medição e identificação destas superfícies nos corpos de prova, observou-se a superfície da rampa dos mesmos: o ponto no qual o jato inicia a sua instabilidade indica, através da sua projeção na altura do corpo de prova, o início do corte rugoso. Este método está melhor explicado adiante. Procedendo-se desta maneira, não foi necessário o rompimento das amostras para identificação destas alturas.

As tabelas seguintes mostram os resultados obtidos nos ensaios de corte retilíneo dos quatro corpos de prova ensaiados.

Tabela 12 — Resultados do corte retilíneo do Granito Preto Piracaia.

	Qualidade 1	Qualidade 2	Qualidade 3	Qualidade 4	Qualidade 5
v (mm/s)	3,38	2,10	1,32	0,95	0,73
b_T (mm)	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
h_{iso} (mm)	18,6	23,9	31,4	32,6	37,9
h_{rug} (mm)	22,8	29,3	34,2	—	—
h (mm)	41,4	53,2	65,6	> 69,0	> 69,0
b_B (mm)	0,9	0,6	0,5	0,5	0,5
T_R	1,6	2,3	2,8	2,8	2,8

Tabela 13 — Resultados do corte retilíneo do

Granito Vermelho Capão Bonito.

	Qualidade 1	Qualidade 2	Qualidade 3	Qualidade 4	Qualidade 5
v (mm/s)	3,38	2,10	1,32	0,95	0,73
b_r (mm)	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
h_{tso} (mm)	18,9	22,5	25,8	34,6	36,7
h_{rug} (mm)	21,4	19,5	22,8	32,4	—
h (mm)	40,3	42,0	48,6	67,0	> 69,0
b_B (mm)	0,5	0,3	0,4	0,3	0,3
T_R	2,6	4,3	3,3	4,3	4,3

Tabela 14 — Resultados do corte retilíneo do Granito Prata

Interlagos

	Qualidade 1	Qualidade 2	Qualidade 3	Qualidade 4	Qualidade 5
v (mm/s)	3,38	2,10	1,32	0,95	0,73
b_r (mm)	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
h_{tso} (mm)	25,3	25,5	29,5	38,4	38,6
h_{rug} (mm)	13,9	20,0	23,7	25,9	—
h (mm)	39,2	45,5	53,2	64,3	> 69,0
b_B (mm)	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4
T_R	2,3	2,8	2,8	3,5	3,5

Tabela 15 — Resultados do corte retilínio do mármore Branco

Campos do Jordão

	Qualidade 1	Qualidade 2	Qualidade 3	Qualidade 4	Qualidade 5
v (mm/s)	6,05	3,76	2,36	1,70	1,31
b_r (mm)	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
h_{liso} (mm)	13,7	19,0	22,6	23,6	31,1
h_{rug} (mm)	22,7	23,6	31,7	—	—
h (mm)	36,4	42,6	54,3	> 60,0	> 60,0
b_B (mm)	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4
T_R	2,3	2,8	2,8	3,5	3,5

Os valores da altura do corte liso (h_{liso}) foram medidos diretamente na rampa. Os valores apresentados nas tabelas são os resultado das respectivas projeções na altura do corpo de prova. Para tal, multiplicou-se o valor obtido na rampa pelo seno do ângulo α (ângulo de inclinação da rampa do corpo de prova, determinado no capítulo 4). O mesmo procedimento foi utilizado para a determinação dos valores do corte total (h). Os valores do corte rugoso (h_{rug}) foram obtidos através da diferença entre h e h_{liso} . Nos casos em que a altura do corte total superou a espessura do corpo de prova, ou seja, nos casos em que o jato cortou totalmente o corpo de prova, não foi possível a determinação do valor do corte total (h), pois este foi limitado apenas pela espessura do corpo de prova. Conseqüentemente, nestes casos não foi possível a

determinação do valor do corte rugoso (h_{rug}). Este fato pode ser observado nas tabelas, e ocorre geralmente nas qualidades 4 e 5, pois nestas qualidades a velocidade do bocal é muito pequena, possibilitando maiores profundidades de corte.

As figuras seguintes ilustram o resultado da digitalização dos corpos de prova ensaiados.

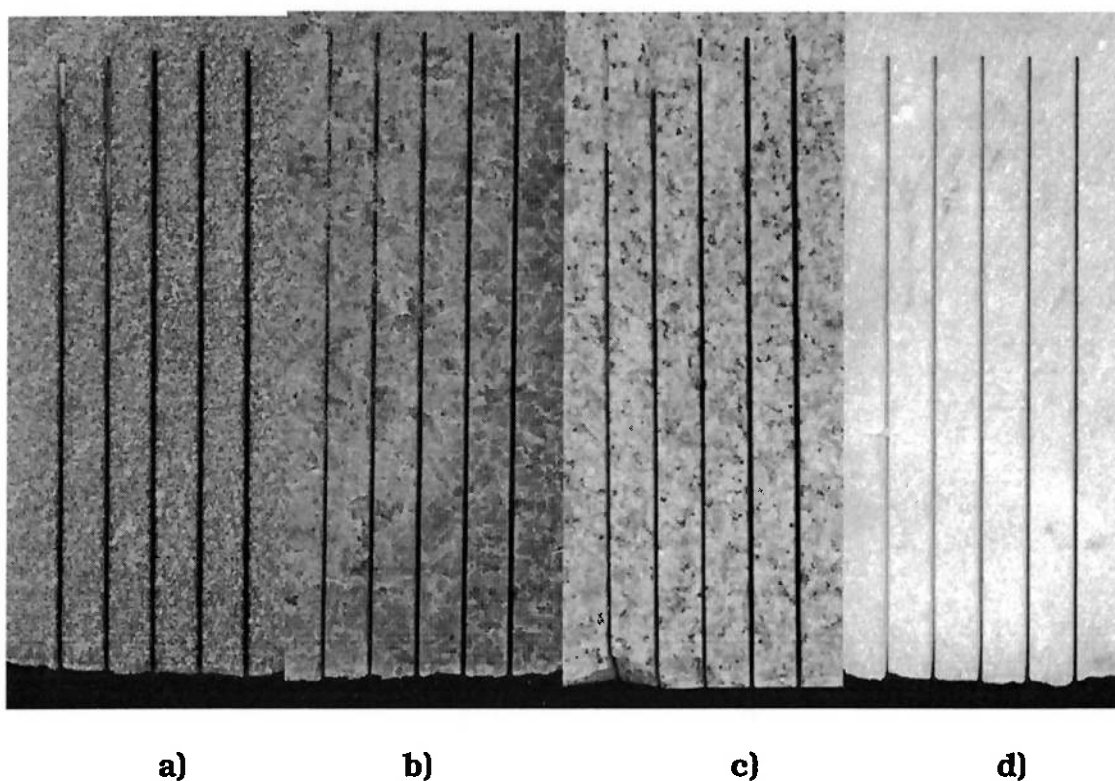


Figura 17 — Digitalização da face superior dos corpos de prova:
a) Granito Preto Piracaia; **b)** Granito Vermelho Capão Bonito;
c) Granito Prata Interlagos; **d)** Mármore Branco Campos do Jordão.

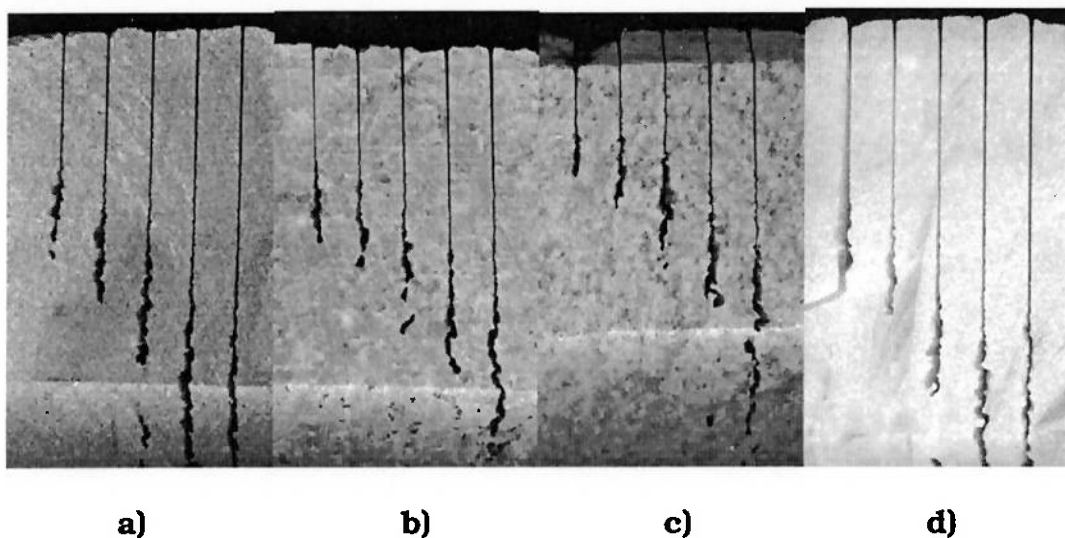


Figura 18 — Digitalização da rampa dos corpos de prova:
a) Granito Preto Piracaia; **b)** Granito Vermelho Capão Bonito;
c) Granito Prata Interlagos; **d)** Mármore Branco Campos do Jordão.

Os gráficos a seguir ilustram a variação da profundidade (ou altura) do corte liso em relação à velocidade do bocal.

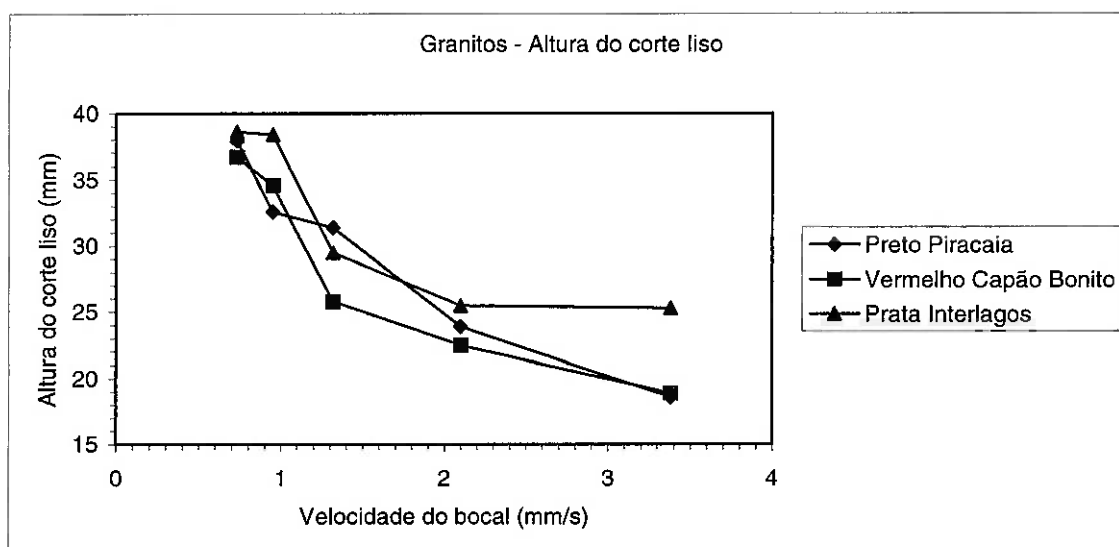


Figura 19 — Altura do corte liso (h_{liso}) em relação à velocidade do bocal (v) para os granitos ensaiados (corte retilíneo).

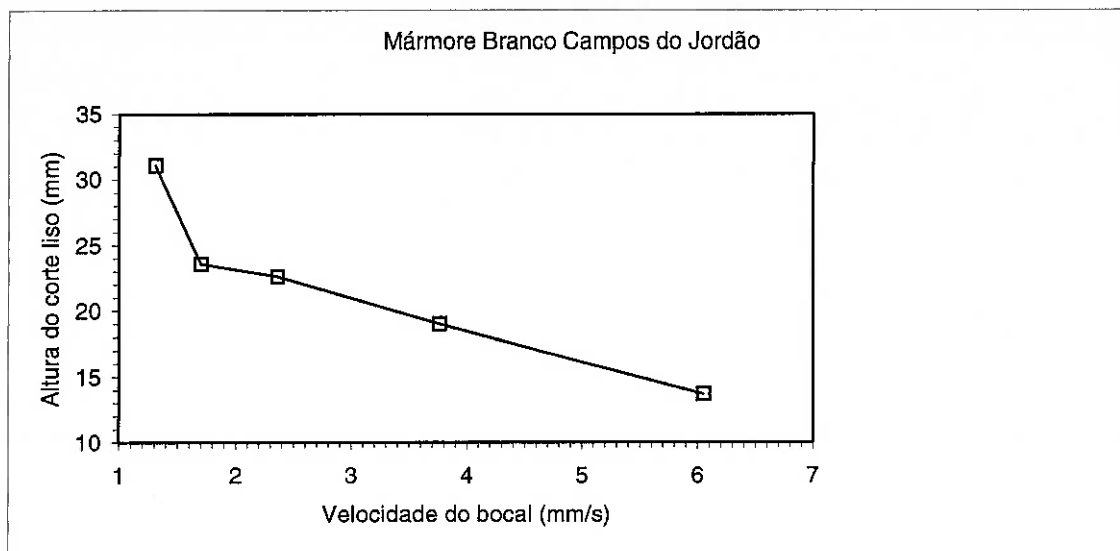


Figura 20 — Altura do corte liso (h_{liso}) em relação à velocidade do bocal (v) para o mármore ensaiado (corte retilíneo).

6.2 Cortes Curvilíneos

Com a ajuda de um paquímetro, foram medidos os diâmetros (superior e inferior) dos cilindros (ou, no caso, cones) obtidos a partir do corte circular dos corpos de prova. A figura 21, a seguir, ilustra estes cilindros (a conicidade foi exagerada na ilustração).

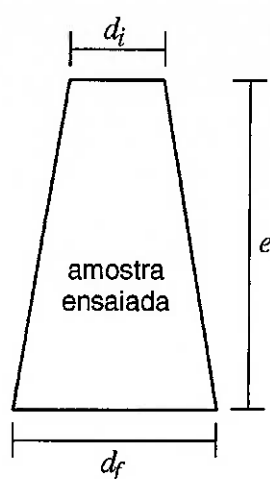


Figura 21 — Esquema dos cilindros obtidos a partir do corte circular dos corpos de prova.

A dimensão d_i é o diâmetro no início do corte. d_f é a medida do diâmetro na saída do jato, depois deste ter atravessado a espessura e da amostra. d_f é sempre maior que d_i . O valor da conicidade (C) é expresso em porcentagem e representa a diferença entre os dois diâmetros em relação à espessura da amostra. Para tanto, utilizamos a seguinte expressão:

$$C(\%) = \frac{d_f - d_i}{e} \times 100 \quad (16)$$

As tabelas a seguir mostram os valores obtidos de acordo com as variações da qualidade de corte (variações da velocidade do bocal) e do diâmetro dos cilindros. Nos casos em que o jato não perfurou a amostra na sua totalidade, os valores não puderam ser medidos, e estão indicados com um traço na tabela.

Tabela 16 — Valores obtidos no corte curvilíneo do Granito Preto Piracaia.

	Qualidade 5		Qualidade 3	
	$v = 0,19$ mm/s ($\varnothing = 25$ mm)	$v = 0,28$ mm/s ($\varnothing = 50$ mm)	$v = 0,77$ mm/s ($\varnothing = 25$ mm)	$v = 1,16$ mm/s $\varnothing = 50$ mm
d_f (mm)	24,0	49,3	—	—
d_t (mm)	23,3	48,6	—	—
e (mm)	48,4	48,4	—	—
C (%)	1,45	1,45	—	—

Tabela 17 — Valores obtidos no corte curvilíneo do Granito Vermelho Capão Bonito.

	Qualidade 5		Qualidade 3	
	$v = 0,19$ mm/s ($\varnothing = 25$ mm)	$v = 0,28$ mm/s ($\varnothing = 50$ mm)	$v = 0,77$ mm/s ($\varnothing = 25$ mm)	$v = 1,16$ mm/s $\varnothing = 50$ mm
d_f (mm)	24,6	50,0	—	—
d_t (mm)	24,0	49,2	—	—
e (mm)	49,5	49,5	—	—
C (%)	1,21	1,61	—	—

Tabela 18 — Valores obtidos no corte curvilíneo do Granito Prata Interlagos.

	Qualidade 5		Qualidade 3	
	$v = 0,19$ mm/s ($\varnothing = 25$ mm)	$v = 0,28$ mm/s ($\varnothing = 50$ mm)	$v = 0,77$ mm/s ($\varnothing = 25$ mm)	$v = 1,16$ mm/s $\varnothing = 50$ mm
d_f (mm)	25,6	49,7	—	—
d_i (mm)	24,0	49,2	—	—
e (mm)	56,2	56,2	—	—
C (%)	2,85	0,89	—	—

Tabela 19 — Valores obtidos no corte curvilíneo do mármore Branco Campos do Jordão.

	Qualidade 5		Qualidade 3	
	$v = 0,27$ mm/s ($\varnothing = 25$ mm)	$v = 0,50$ mm/s ($\varnothing = 50$ mm)	$v = 1,36$ mm/s ($\varnothing = 25$ mm)	$v = 2,04$ mm/s $\varnothing = 50$ mm
d_f (mm)	24,7	49,7	26,0	51,0
d_i (mm)	24,5	49,3	24,5	49,6
e (mm)	52,0	52,0	52,0	52,0
C (%)	0,39	0,77	2,89	2,69

A tabela 19 permite uma completa visualização da alteração das dimensões devido ao aumento da velocidade do bocal de corte. Para diâmetros de 25 mm, um aumento de velocidade de 0,27 mm/s para 1,36 mm/s provocou um aumento expressivo no valor da conicidade, de 0,39% para 2,89%, respectivamente. O mesmo ocorreu para o diâmetro

de corte de 50 mm: um aumento de velocidade de 0,50 mm/s para 2,04 mm/s provocou um aumento na conicidade de 0,77% para 2,69%.

No caso dos granitos, infelizmente não foi possível a comparação entre valores de mesmo diâmetro, pois na qualidade 3 o jato não perfurou a total espessura da amostra. Por outro lado, sabe-se que não é possível o corte circular nas velocidades fornecidas para o nível de qualidade 3.

A figura 22, a seguir, ilustra o resultado da digitalização da amostra do Granito Prata Interlagos submetido ao ensaio de corte curvilíneo. Nota-se que, na qualidade 3 de corte, o jato não atingiu a parte inferior do corpo de prova.

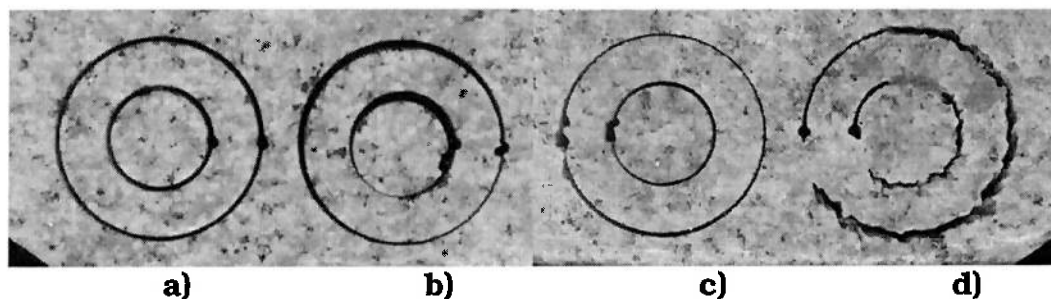


Figura 22 — Resultado da digitalização da amostra do Granito Prata Interlagos após o ensaio de corte curvilíneo. À esquerda, face superior do corpo de prova: **a)** qualidade 3 e **b)** qualidade 5. À direita, a face inferior: **c)** qualidade 5 e **d)** qualidade 3.

7. Interpretação dos Resultados

Os resultados apresentados no capítulo anterior podem ser interpretados quantitativamente, através da análise dos valores de profundidade de corte obtidos, ou qualitativamente, pelo exame do acabamento das superfícies de corte. Vamos iniciar por uma avaliação quantitativa dos resultados.

Em relação ao corte curvilíneo, podemos observar que, nos granitos ensaiados, não foi possível a realização do corte na qualidade 3. Este fato pressupõe que os granitos brasileiros, pelo menos os ensaiados, são mais “difíceis” de ser cortados. Talvez apresentem um número de maquinação inferior a 322, número este genérico para granitos. O corte do mármore foi possível em qualidade 3, mas o acabamento da superfície cortada não condiz com o nível de qualidade adotado.

Todos os cilindros apresentaram conicidade. Este fato já era esperado, pois o jato (tanto a água como as partículas de abrasivo) está sempre “atrasado” em relação ao bocal. A figura 13, capítulo 5, ilustra o fenômeno.

Em relação aos ensaios de corte retilíneo, o gráfico da figura 19 mostra que granitos diferentes apresentam um comportamento diferente quando cortados através do jato d'água abrasivo, embora

ZENG *et al.* (1992) tenham determinado apenas um número de maquinação para granitos (322) e para mármore (525). Com o objetivo de verificar o modelo proposto por ZENG *et al.* (1992), descrito no capítulo 3 desta dissertação, vamos substituir os parâmetros do processo utilizados na equação 11, copiada a seguir, e verificar qual é a profundidade de corte estimada (h_{est}).

$$h_{est} = \frac{N_m \times p^{1,25} \times \dot{m}_A^{0,343} \times Q_w^{0,687}}{C \times v^{0,866} \times d_f^{0,618}} \quad (17)$$

Para tanto, é necessário determinar, em primeiro lugar, todos os parâmetros de processo requeridos pela citada equação.

A pressão hidráulica, p , é conhecida, e seu valor é 290 MPa. O fluxo de massa de abrasivo, \dot{m}_A , também é conhecido, e seu valor é 5,5 g/s. O fluxo de água Q_w pode ser determinado a partir da equação 4, reproduzida, a seguir, com os devidos valores:

$$Q_w = C_d \times \frac{\pi}{4} \times d_0^2 \times \sqrt{\frac{2p}{\rho_w}} = 0,7 \times \frac{3,14}{4} \times (0,356 \times 10^{-3})^2 \times \sqrt{\frac{2 \times 290 \times 10^6}{1000}}$$

$$Q_w = 5,3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} \cong 3,2 \text{ l} / \text{min} \quad (18)$$

O valor do coeficiente de descarga, C_d , foi sugerido por HASHISH (1993).

Na equação 17, a constante C , para unidades métricas, tem o valor de 8.800 (ZENG *et al.*, 1992). O diâmetro do bocal, d_f , é 0,762 mm.

As velocidades utilizadas no experimento encontram-se na tabela 9. Como na equação 17 não há menção ao nível de qualidade de corte q , podemos considerá-lo unitário, e devemos comparar as profundidades

de corte obtidas através desta equação (h_{est}) com as profundidades de corte total (h) obtidas experimentalmente para os granitos (tabelas 12, 13 e 14) e para o mármore (tabela 15). As tabelas 20 e 21, a seguir, apresentam a comparação entre esses valores.

Tabela 20 — Comparação entre os valores estimados e experimentais para as profundidades de corte dos granitos.

v (mm/s)	h_{est} (mm)	Preto Piracaia h (mm)	Vermelho Capão Bonito h (mm)	Prata Interlagos h (mm)
3,38	72,0	41,4	40,3	39,2
2,10	108,7	53,2	42,0	45,5
1,32	162,5	65,6	48,6	53,2

Tabela 21 — Comparação entre os valores estimados e experimentais para as profundidades de corte do mármore.

v (mm/s)	h_{est} (mm)	h (mm)
6,05	70,9	36,4
3,76	107,0	42,6
2,36	160,2	54,3

Notamos, pelas tabelas 20 e 21, que os valores estimados são muito superiores aos obtidos. MOMBER; KOVACEVIC (1998) confirmaram este fato. Além disso, observaram que o erro é maior para profundidades maiores

ZENG *et al.* (1992) afirmaram que o tipo de abrasivo utilizado é um parâmetro importante, e que o emprego de diferentes tipos de abrasivo pode resultar em grandes diferenças na profundidade de corte obtida. O tipo de abrasivo utilizado não foi incorporado ao modelo pois “(1) o efeito do tipo de abrasivo no mecanismo de remoção de material não é bem compreendido e (2) é difícil incorporar o tipo de abrasivo em uma equação analítica” (ZENG *et al.*, 1992). Os autores utilizaram granada (não especificaram a granulometria) para o equacionamento do modelo.

Não podemos deixar de levar em consideração que o número de maquinação dos materiais ensaiados pode ser, e provavelmente é, diferente do valor genérico para mármore e granitos determinado por ZENG *et al.* (1992).

Do ponto de vista prático, os gráficos das figuras 19 e 20 nos dizem que à medida que a velocidade do bocal diminui, aumentam as profundidades de corte. Podemos observar que uma velocidade do bocal de aproximadamente 3 mm/s é suficiente para produzir cortes lisos em chapas com espessura de 20 mm (ou inferior) nos quatro materiais ensaiados. É importante observar que estamos falando em profundidades de corte liso. Se o objetivo é apenas “partir” o material, podem ser utilizadas velocidades maiores, referentes à profundidade de corte total (tabelas 12 a 15). Neste caso, o acabamento da superfície cortada apresenta uma região de estrias profundas. Em se tratando de rochas ornamentais, a lisura ou regularidade da superfície de acabamento é feita por metodologia que pode ser encontrada em

normas dos países desenvolvidos. Um exemplo é o caso da norma terminológica italiana “UNI EDL 0083”, da *Ente Nazionale Italiano di Unificazione* (MARMI ITALIANI, 1982). Esta norma define a lisura de uma superfície de rocha ornamental através de comparações com superfícies lixadas por abrasivos de diferentes granulometrias. Para tanto, o termo “levigado” é muito utilizado no comércio de rochas ornamentais^{*}. A norma define os termos que devem ser utilizados para caracterizar as superfícies, mostrados na tabela 22, a seguir.

Tabela 22 — Terminologia dos vários graus de acabamento de rochas ornamentais.

Fonte: MARMI ITALIANI, 1982.

Terminologia	Granulometria equivalente
Levigado grosso	60
Levigado médio ou normal	120
Levigado fino	220
Superfície semi-lustrosa	400

Com a finalidade de visualizar o acabamento das superfícies cortadas pelo jato d'água abrasivo, e compará-lo com as superfícies definidas pela norma citada, foi preparada uma série de amostras de um dos granitos ensaiados (Vermelho Capão Bonito) e do mármore

^{*} Informação verbal do Prof. Antonio Stellin Jr.

Branco Campos do Jordão, para observação através da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

A série completa de amostras confeccionadas constou de nove tipos: 1) superfície lisa gerada através do corte por jato d'água abrasivo; 2) superfície rugosa gerada através do corte por jato d'água abrasivo; 3) superfície cortada por serra diamantada; 4) superfície de acabamento com lixa de 60 malhas (levigado 60); 5) superfície de acabamento com lixa de 120 malhas (levigado 120); 6) superfície de acabamento com lixa de 220 malhas (levigado 220); 7) superfície de acabamento com lixa de 400 malhas (superfície semi-lustrosa); 8) superfície polida pelo marmorista; 9) superfície de fratura.

As fotomicrografias, obtidas no Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, são mostradas, a seguir, através das figuras 23 a 31 (granito) e 32 a 40 (mármore). Cada figura mostra a mesma amostra em diferentes magnitudes, com exceção da amostra polida.

Observando estas fotomicrografias, podemos fazer algumas observações interessantes. Na figura 23a podemos observar a leve formação de estrias, embora se trate de uma região de corte liso. Estas estrias são evidentes nas figuras 24a e 33a.

As figuras 26, 27, 28 e 29 (granito), 35, 36, 37 e 38 (mármore) mostram superfícies lixadas progressivamente (levigado 60 a semi-lustrosa). Em todas elas, com aumento de 100 vezes, podemos notar a

presença de riscos provocados pela lixa. Estes riscos são muito evidentes na figura 37a.

Uma ilustração curiosa é a figura 31d, da superfície de fratura do granito Vermelho Capão Bonito, na qual se fotografou parte de uma vesícula no granito, onde foi possível identificar um cristal de quartzo idiomórfico com seu prisma hexagonal de terminação piramidal.

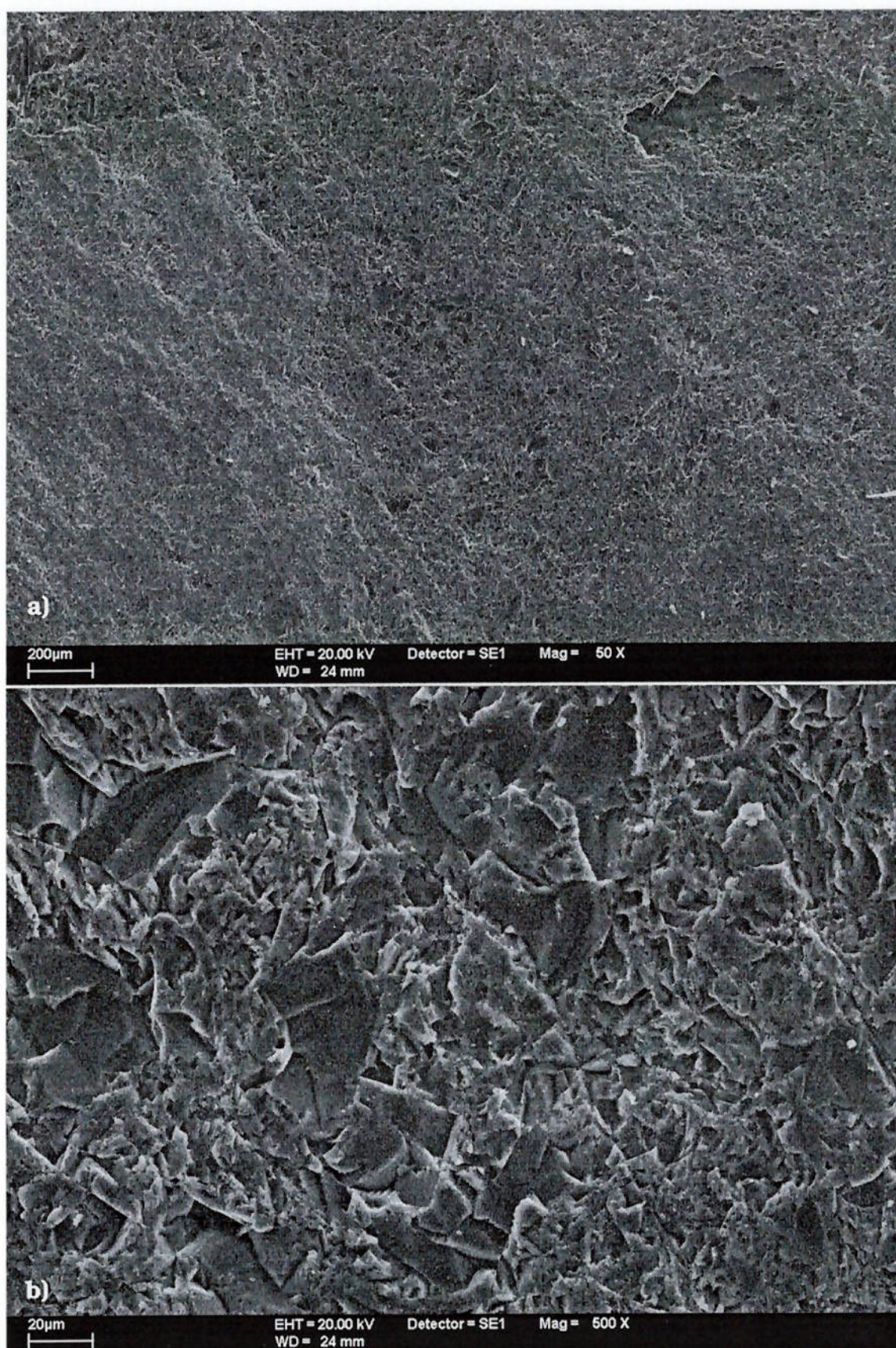


Figura 23 — Fotomicrografias da superfície do granito Vermelho Capão Bonito cortada por jato d'água abrasivo (região de corte liso).
a) aumento de 50 vezes; **b)** aumento de 500 vezes.

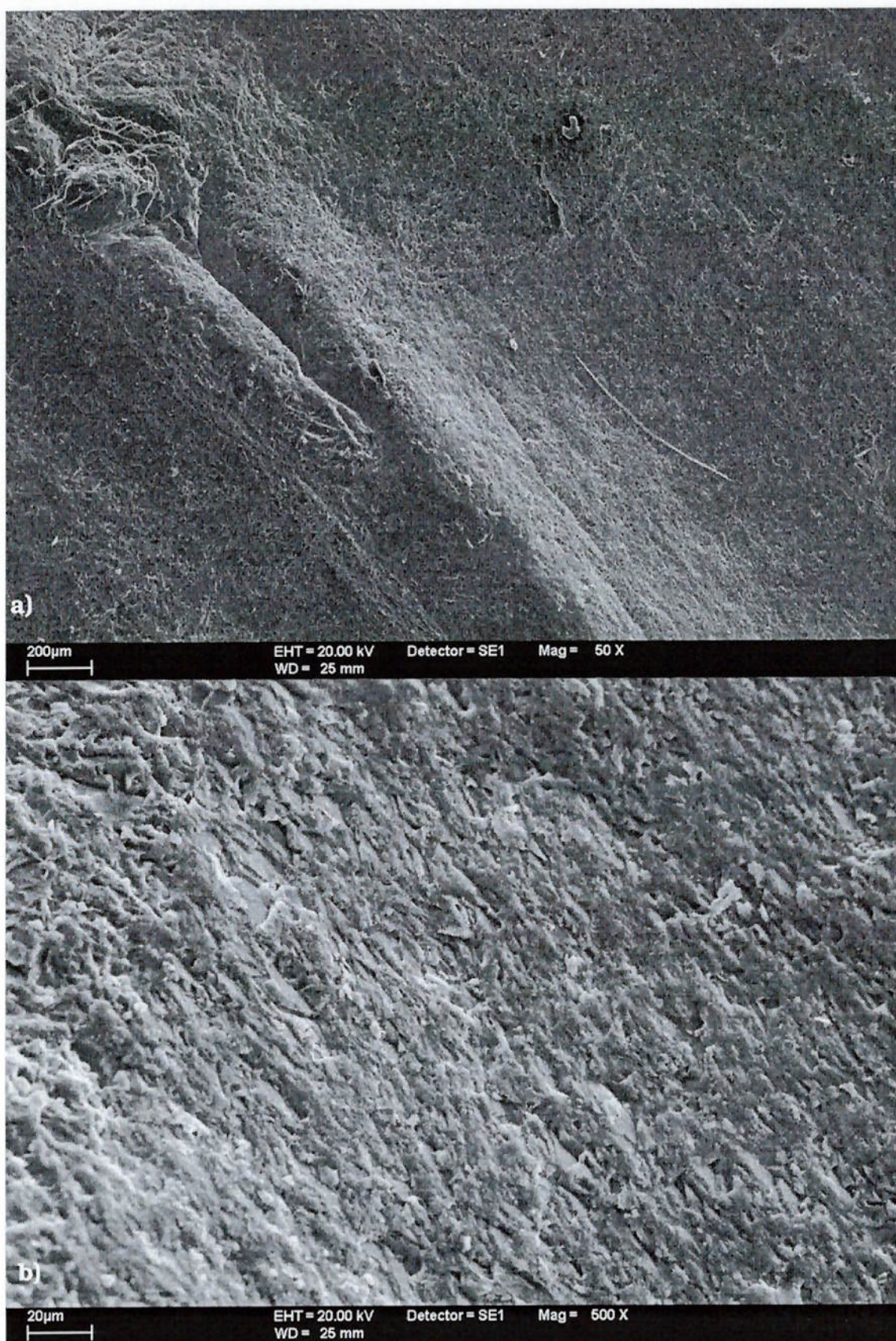


Figura 24 — Fotomicrografias da superfície do granito Vermelho Capão Bonito cortada por jato d'água abrasivo (região de corte rugoso).
a) aumento de 50 vezes; **b)** aumento de 500 vezes.

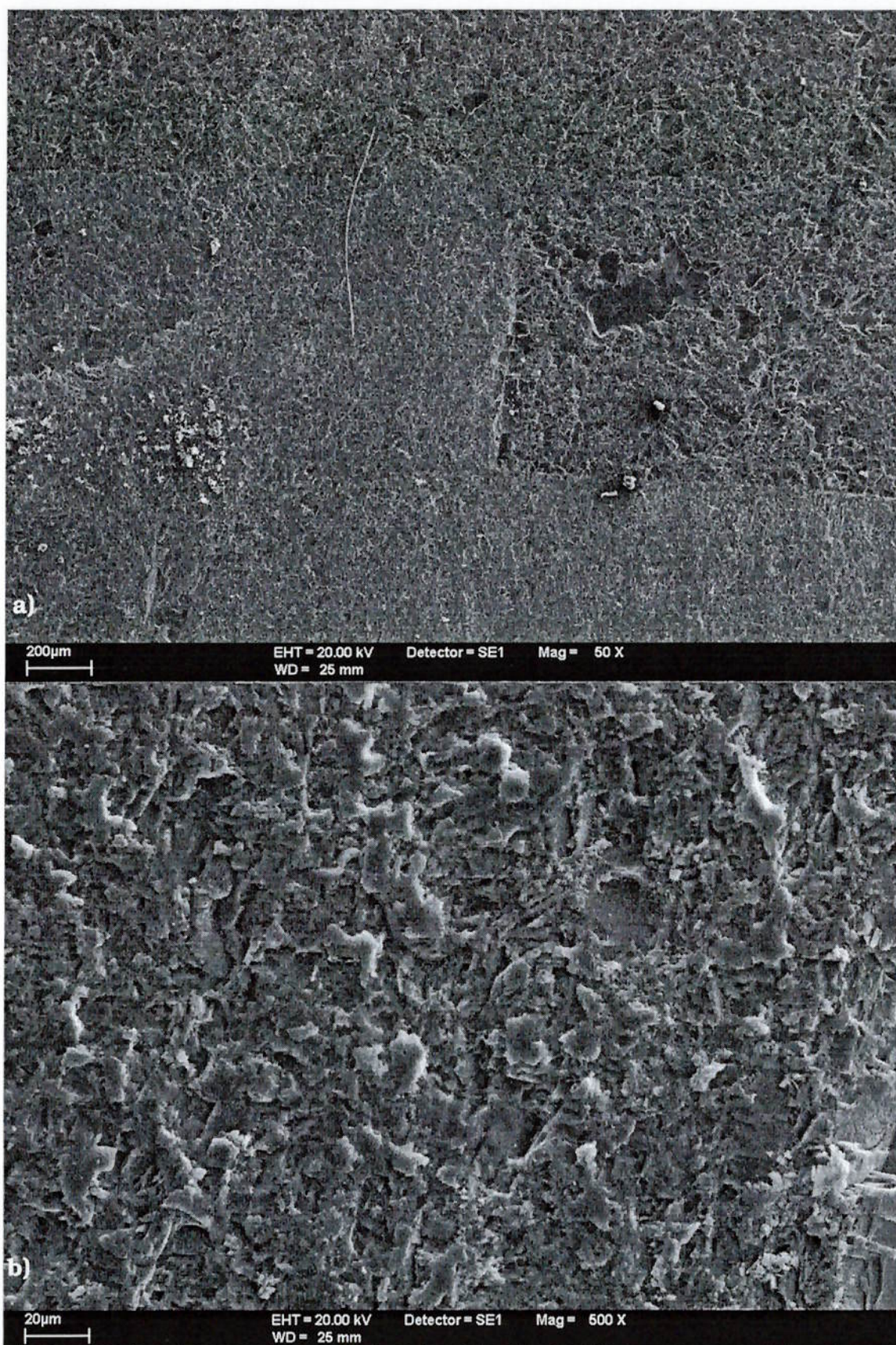


Figura 25 — Fotomicrografias da superfície do granito Vermelho Capão Bonito cortada por meio de serra diamantada.
a) aumento de 50 vezes; **b)** aumento de 500 vezes.

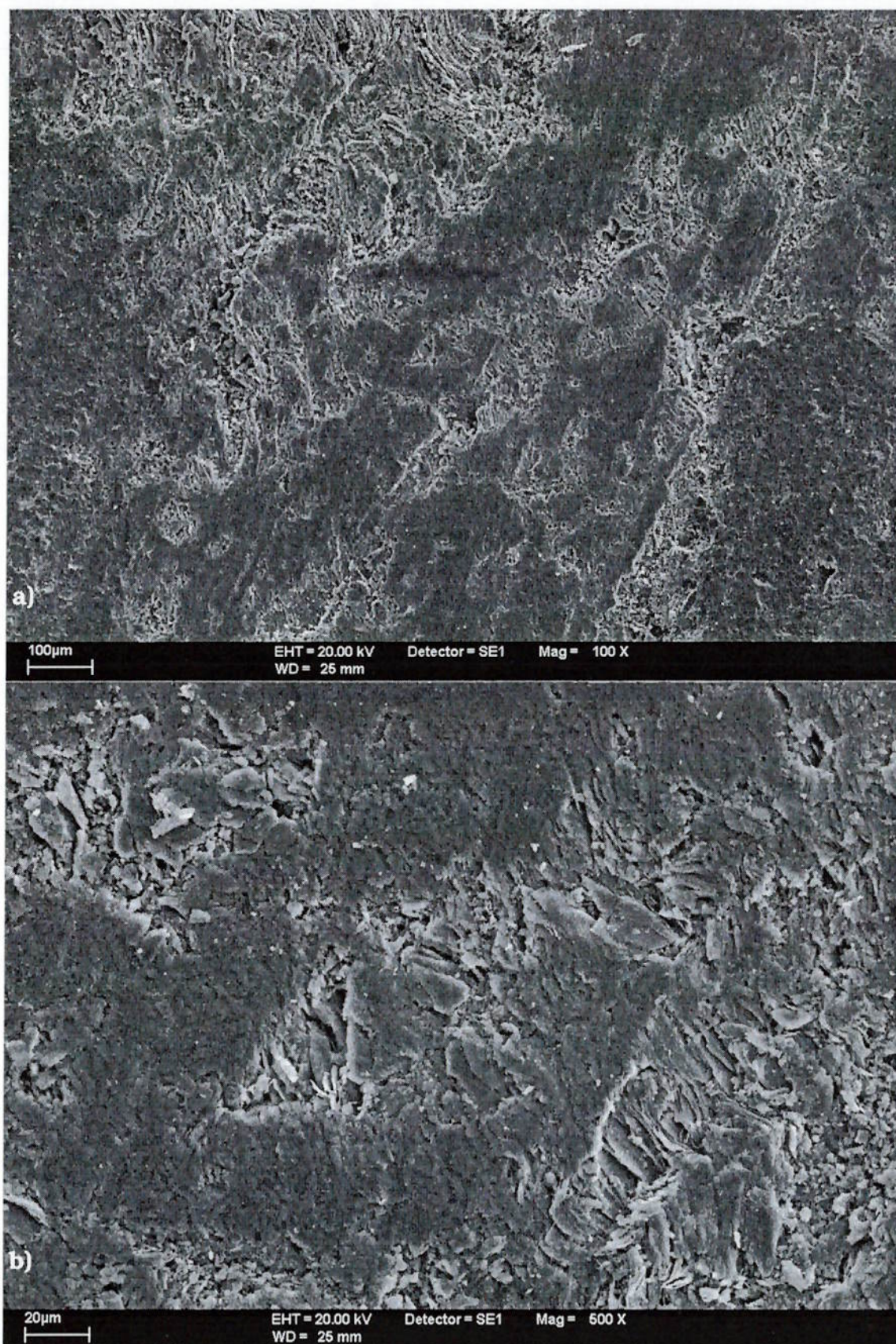


Figura 26 — Fotomicrografias da superfície do granito Vermelho Capão Bonito submetida à lixa de granulometria 60 (levigado 60)
a) aumento de 100 vezes; **b)** aumento de 500 vezes.

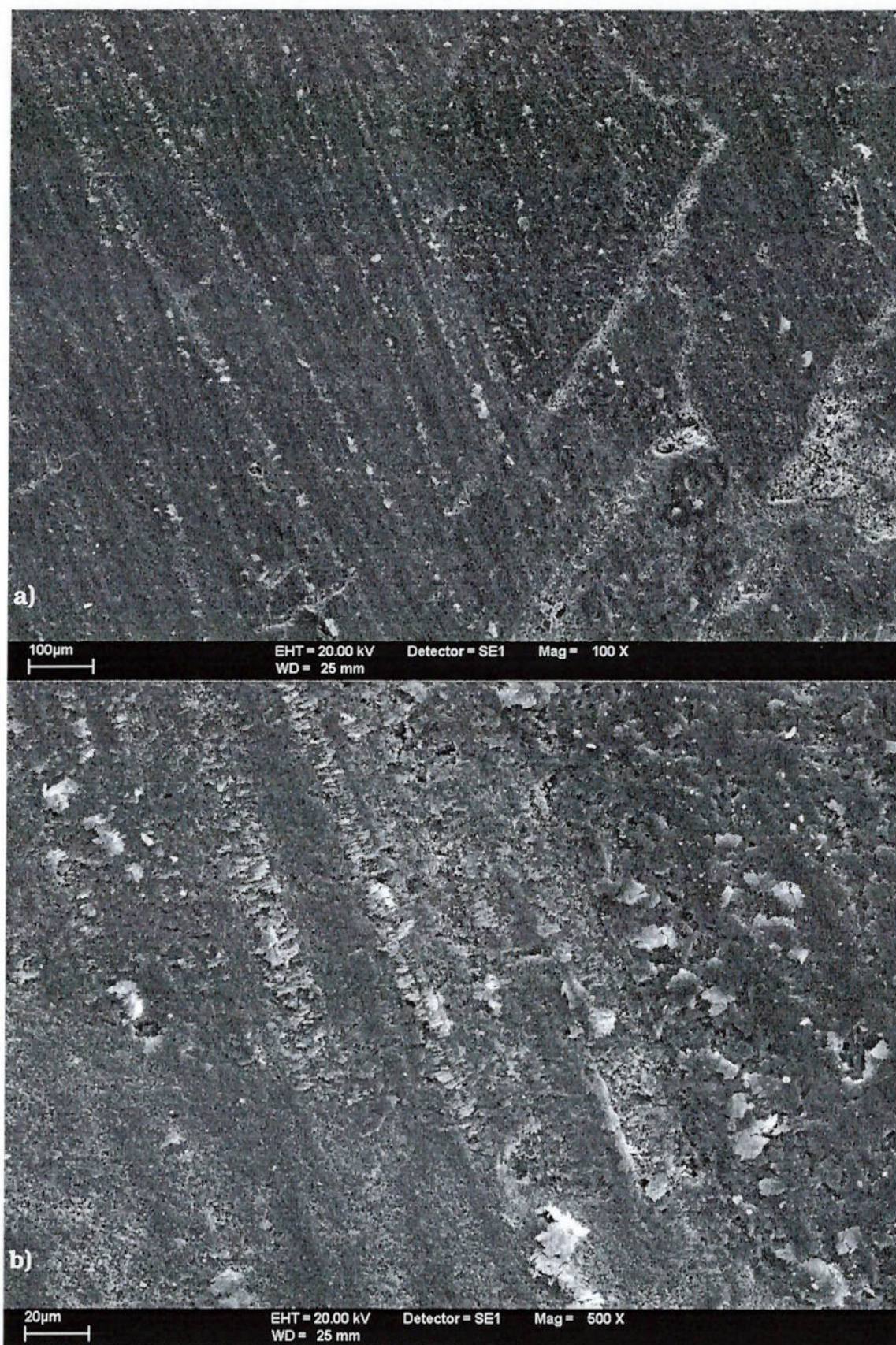


Figura 27 — Fotomicrografias da superfície do granito Vermelho Capão Bonito submetida à lixa de granulometria 120 (levigado 120)
a) aumento de 100 vezes; **b)** aumento de 500 vezes.

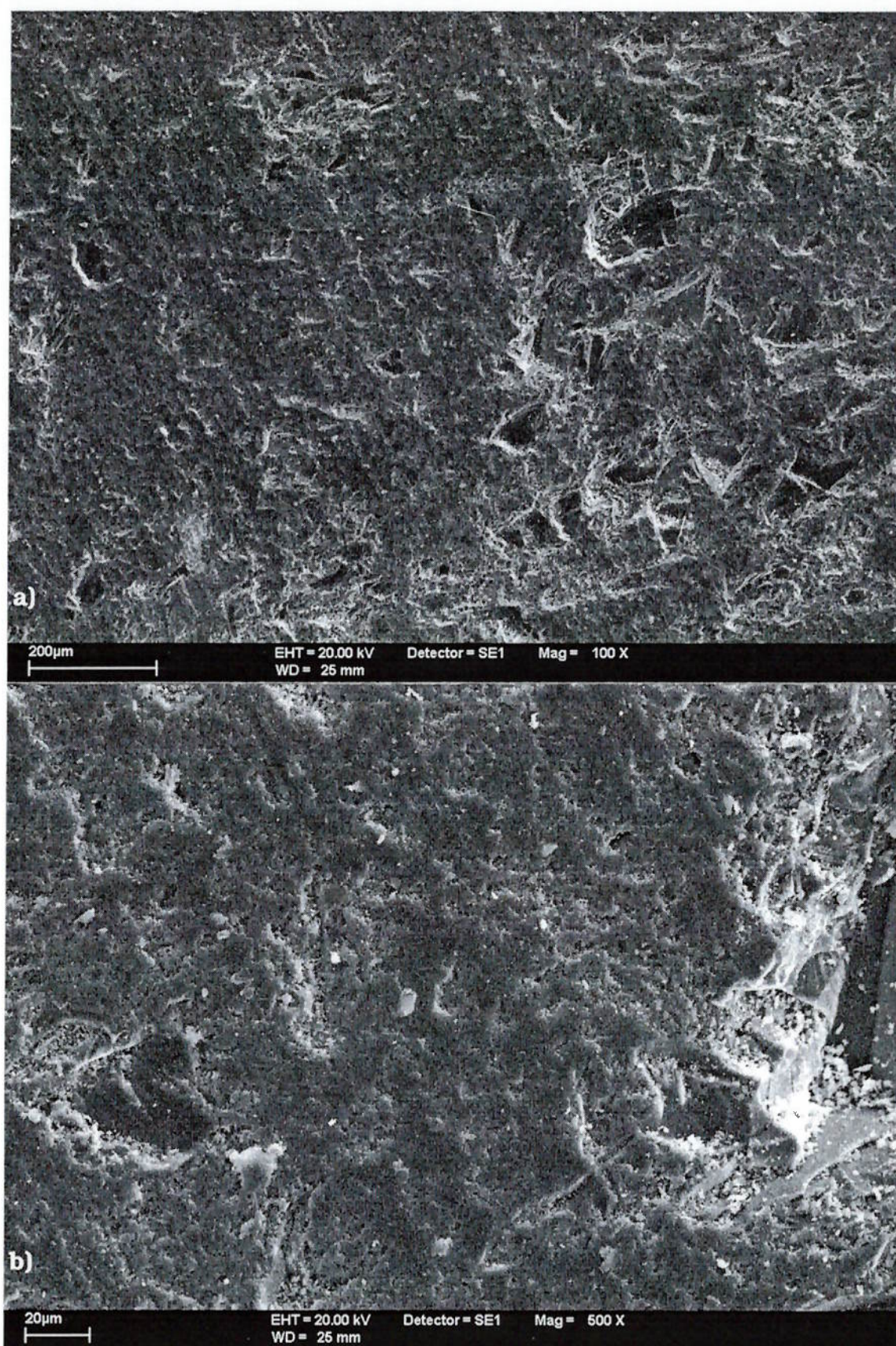


Figura 28 — Fotomicrografias da superfície do granito Vermelho Capão Bonito submetida à lixa de granulometria 220 (levigado 220)
a) aumento de 100 vezes; **b)** aumento de 500 vezes.

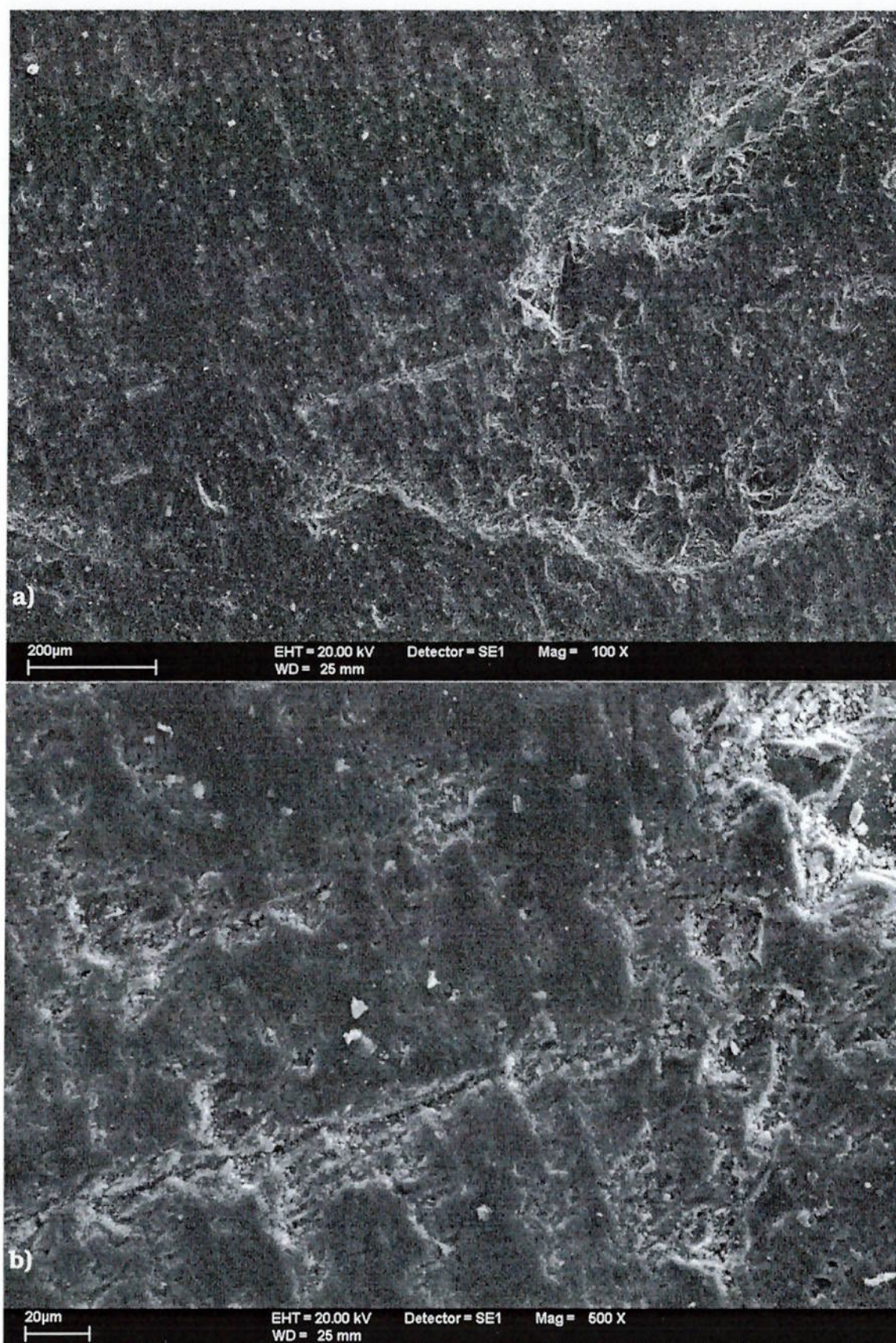


Figura 29 — Fotomicrografias da superfície do granito Vermelho Capão Bonito submetida à lixa de granulometria 400 (superfície semi-lustrosa)
a) aumento de 100 vezes; **b)** aumento de 500 vezes.

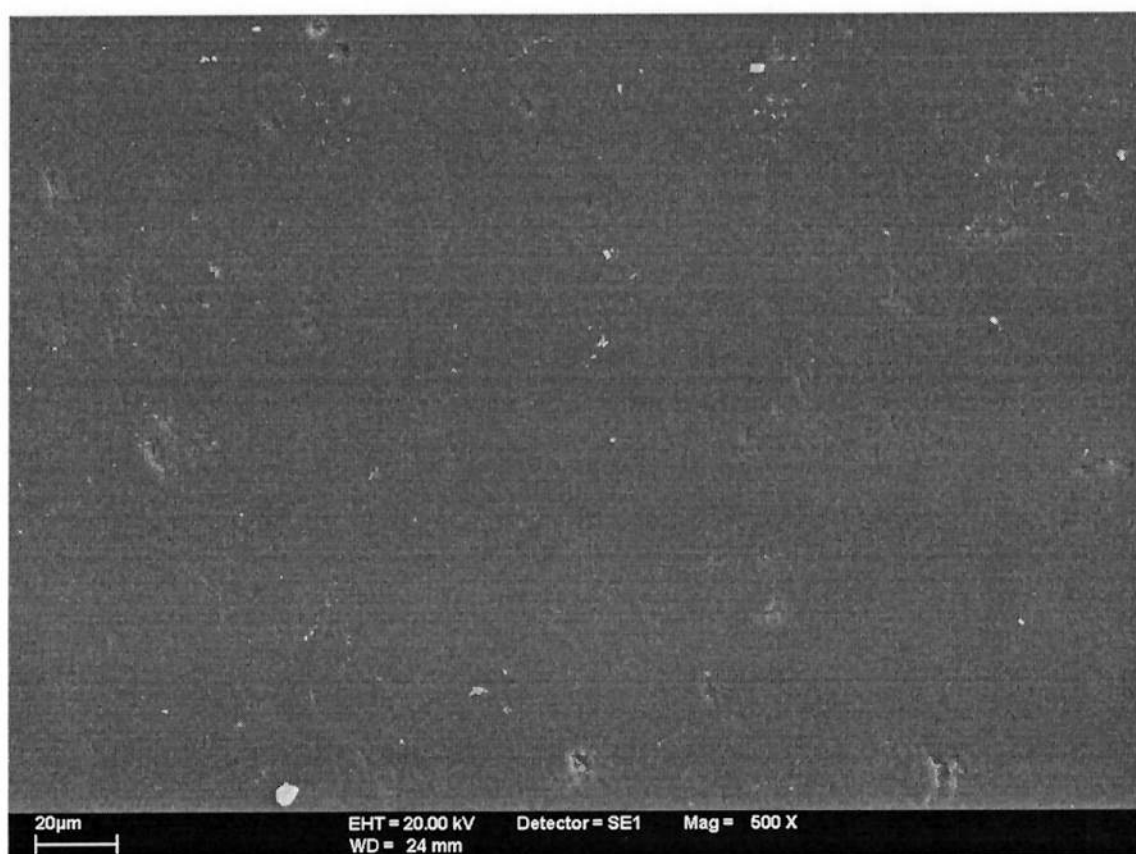


Figura 30 — Fotomicrografia da superfície polida do granito Vermelho Capão Bonito.

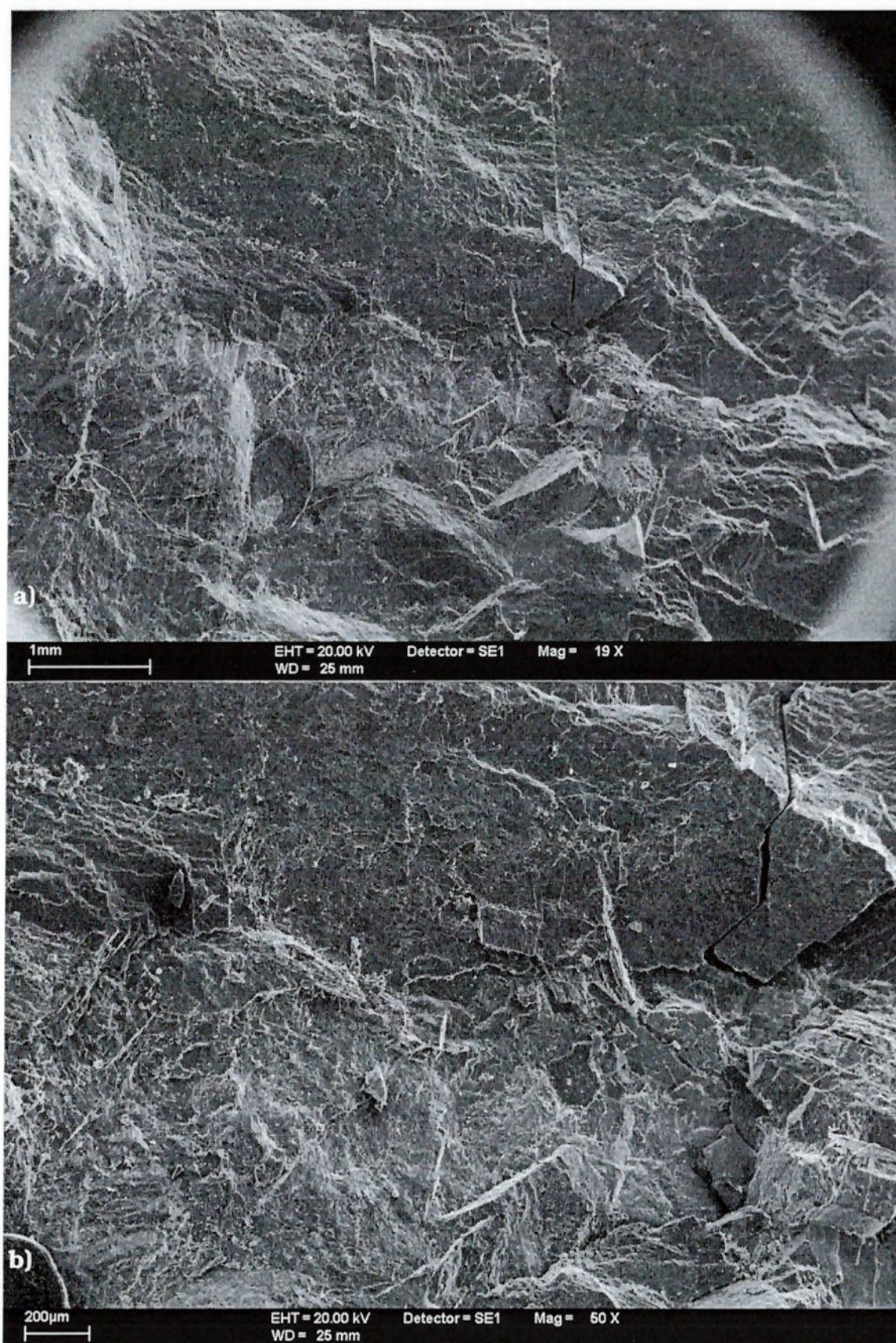


Figura 31 — Fotomicrografias da superfície do granito Vermelho Capão Bonito fraturada.

a) aumento de 19 vezes; **b)** aumento de 50 vezes.

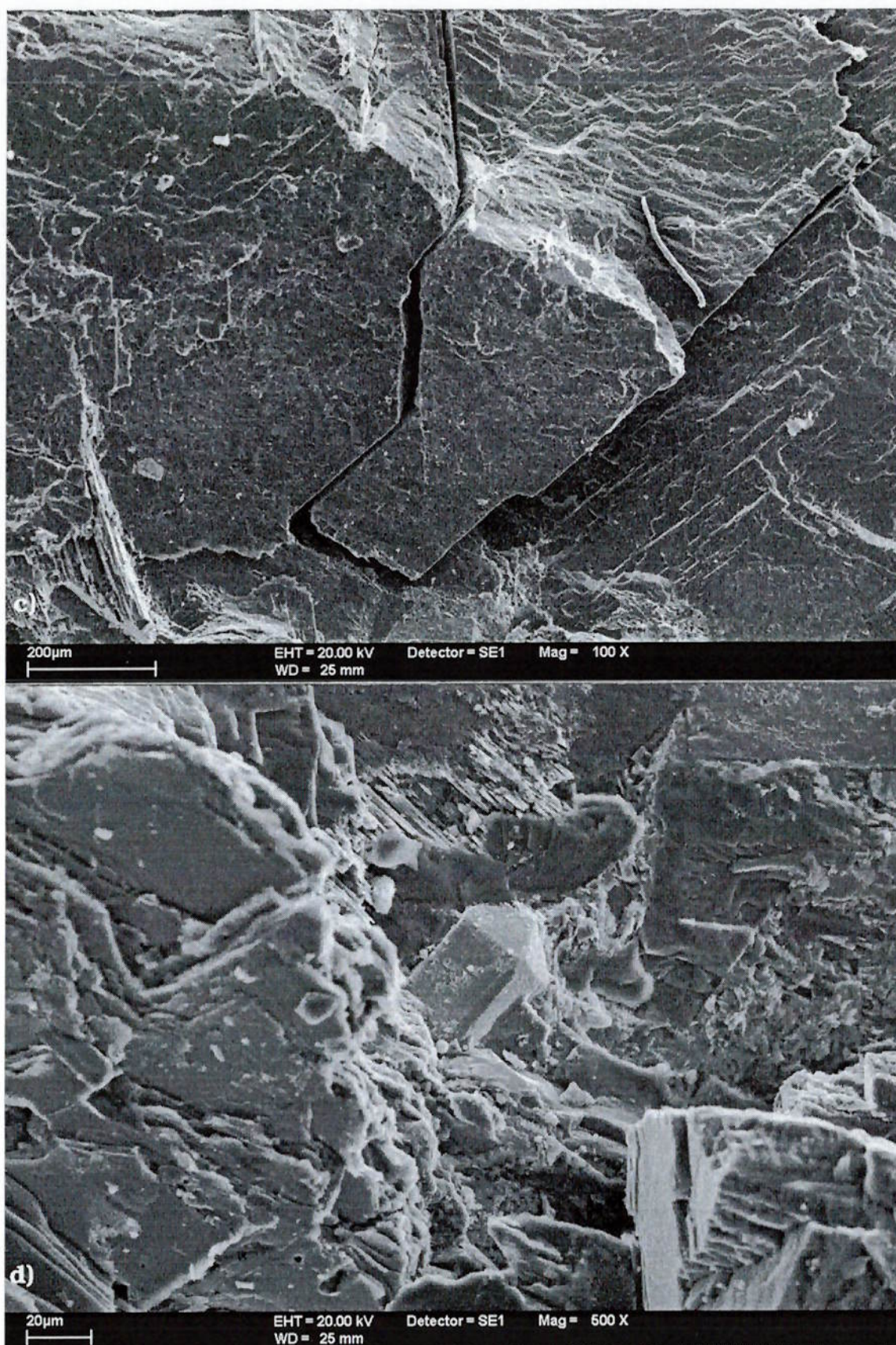


Figura 31 — Fotomicrografias da superfície do granito Vermelho Capão Bonito fraturada (continuação).

c) aumento de 100 vezes; **d)** aumento de 500 vezes.

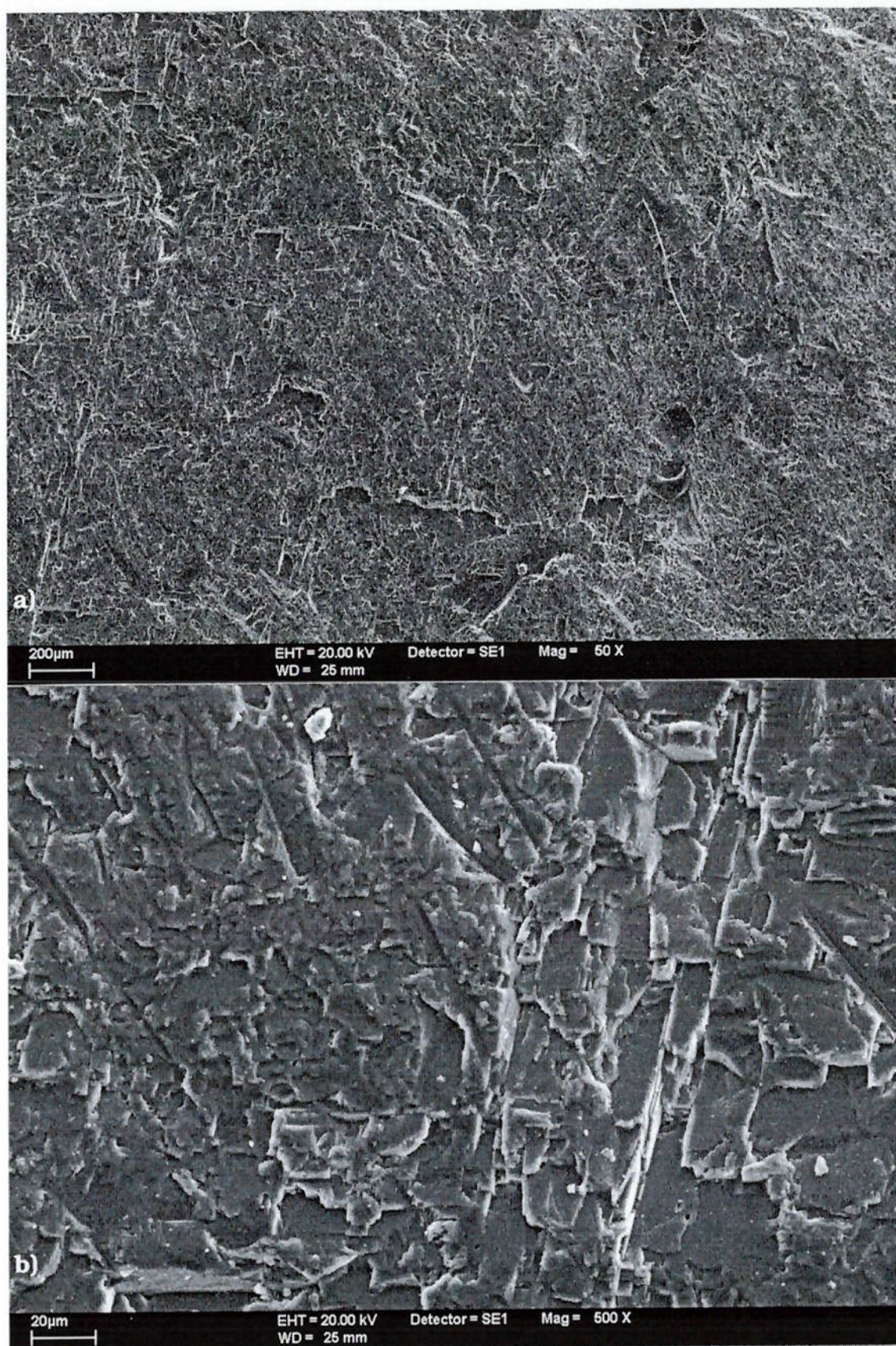


Figura 32 — Fotomicrografias da superfície do mármore Branco Campos do Jordão cortada por jato d'água abrasivo (região lisa).
a) aumento de 50 vezes; **b)** aumento de 500 vezes.

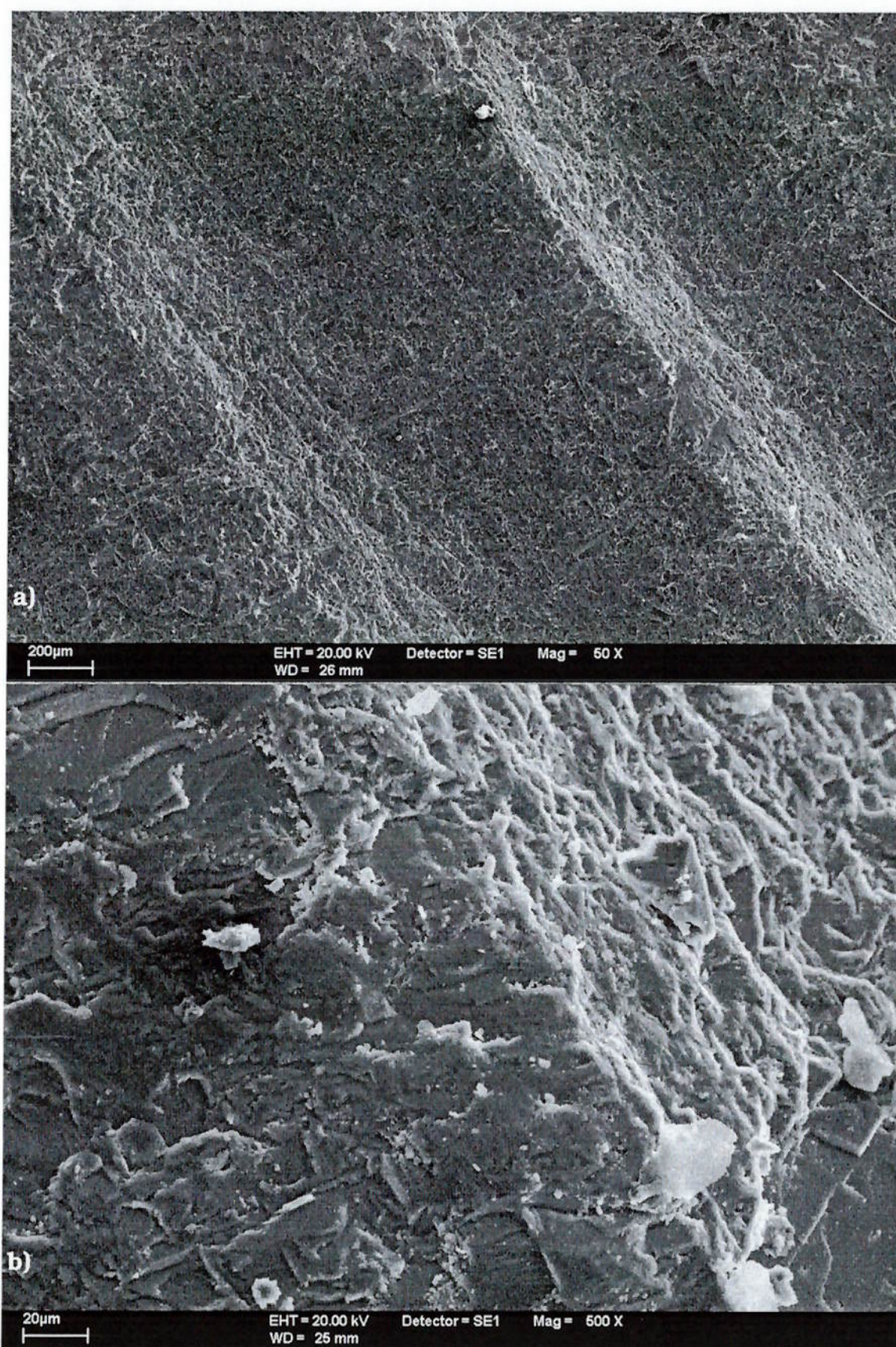


Figura 33 — Fotomicrografias da superfície do mármore Branco Campos do Jordão cortada por jato d'água abrasivo (região rugosa).
a) aumento de 50 vezes; **b)** aumento de 500 vezes.

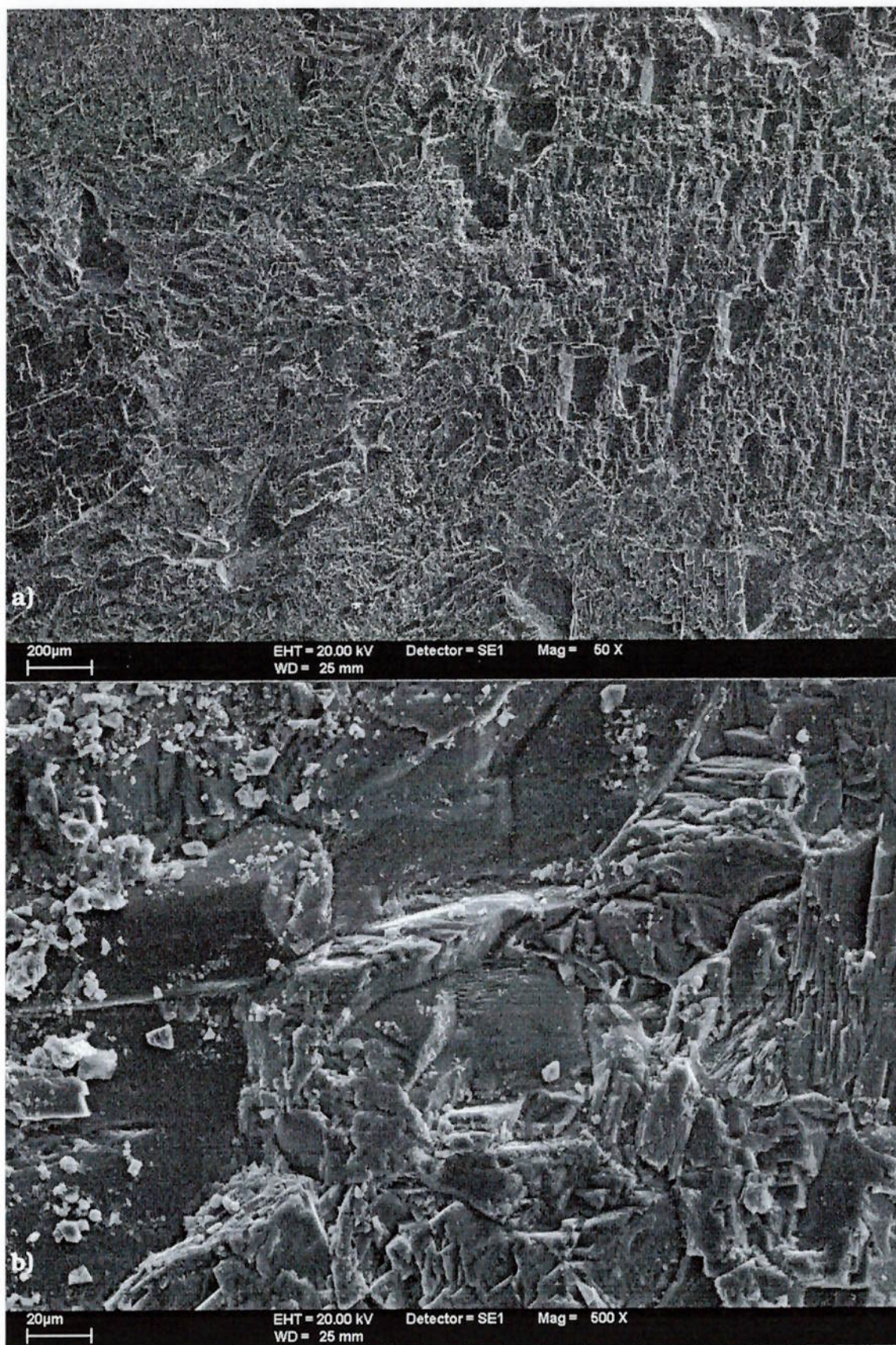


Figura 34 — Fotomicrografias da superfície do mármore Branco Campos do Jordão cortada por meio de serra diamantada.
a) aumento de 50 vezes; **b)** aumento de 500 vezes.

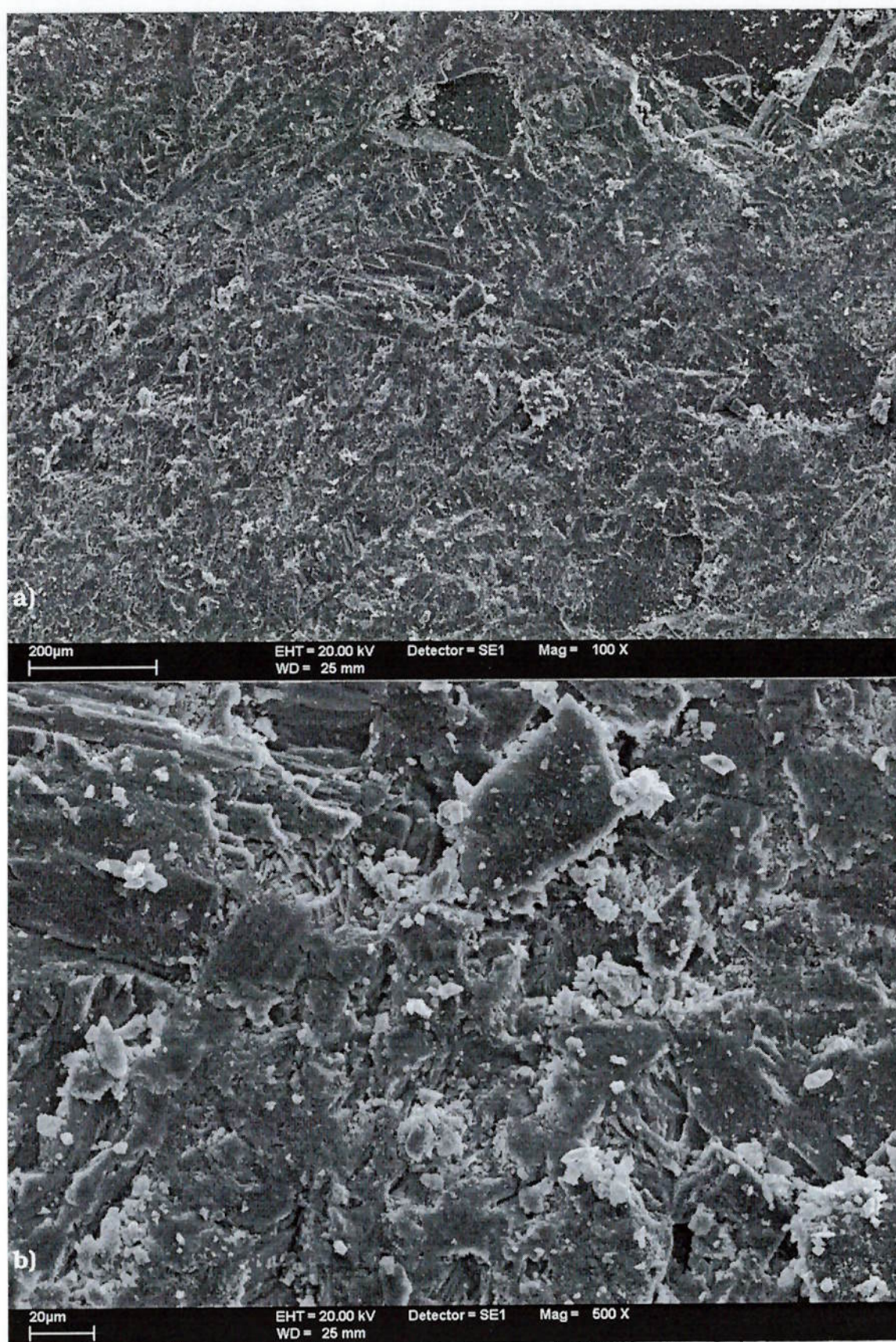


Figura 35 — Fotomicrografias da superfície do mármore Branco Campos do Jordão submetida à lixa de granulometria 60 (levigado 60).
a) aumento de 100 vezes; **b)** aumento de 500 vezes.

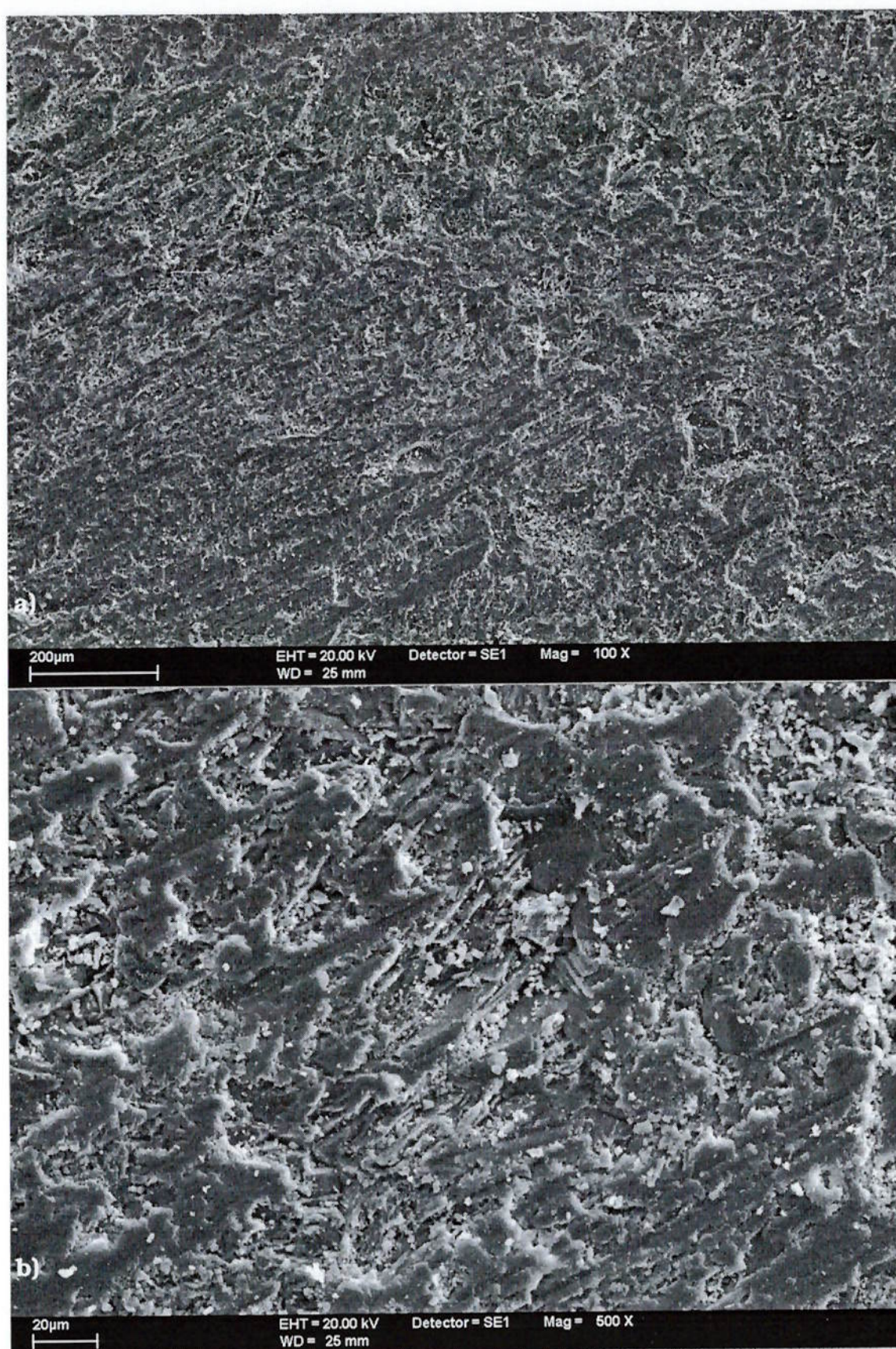


Figura 36 — Fotomicrografias da superfície do mármore Branco Campos do Jordão submetida à lixa de granulometria 120 (levigado 120).
a) aumento de 100 vezes; b) aumento de 500 vezes.

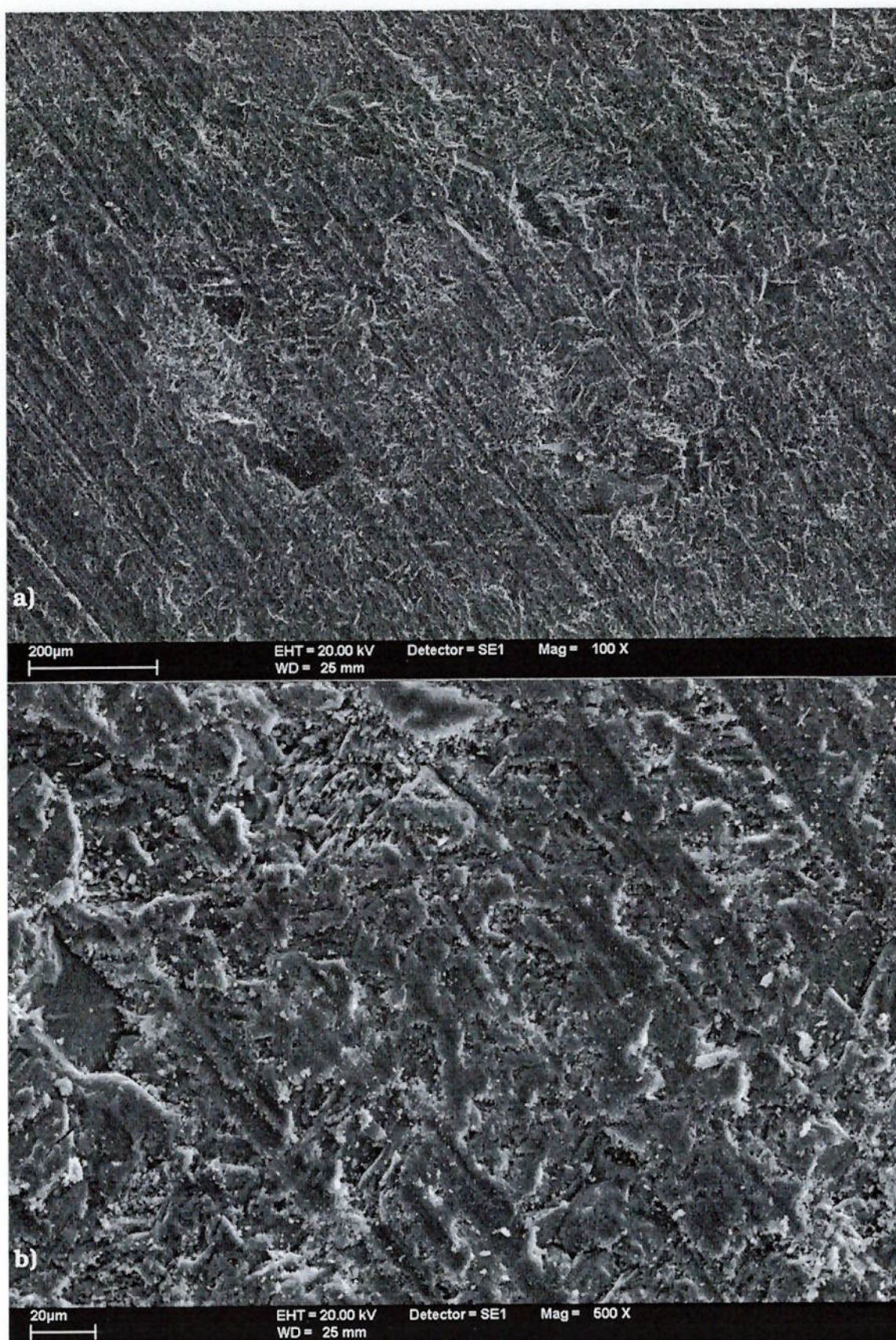


Figura 37 — Fotomicrografias da superfície do mármore Branco Campos do Jordão submetida à lixa de granulometria 220 (levigado 220).
a) aumento de 100 vezes; **b)** aumento de 500 vezes.

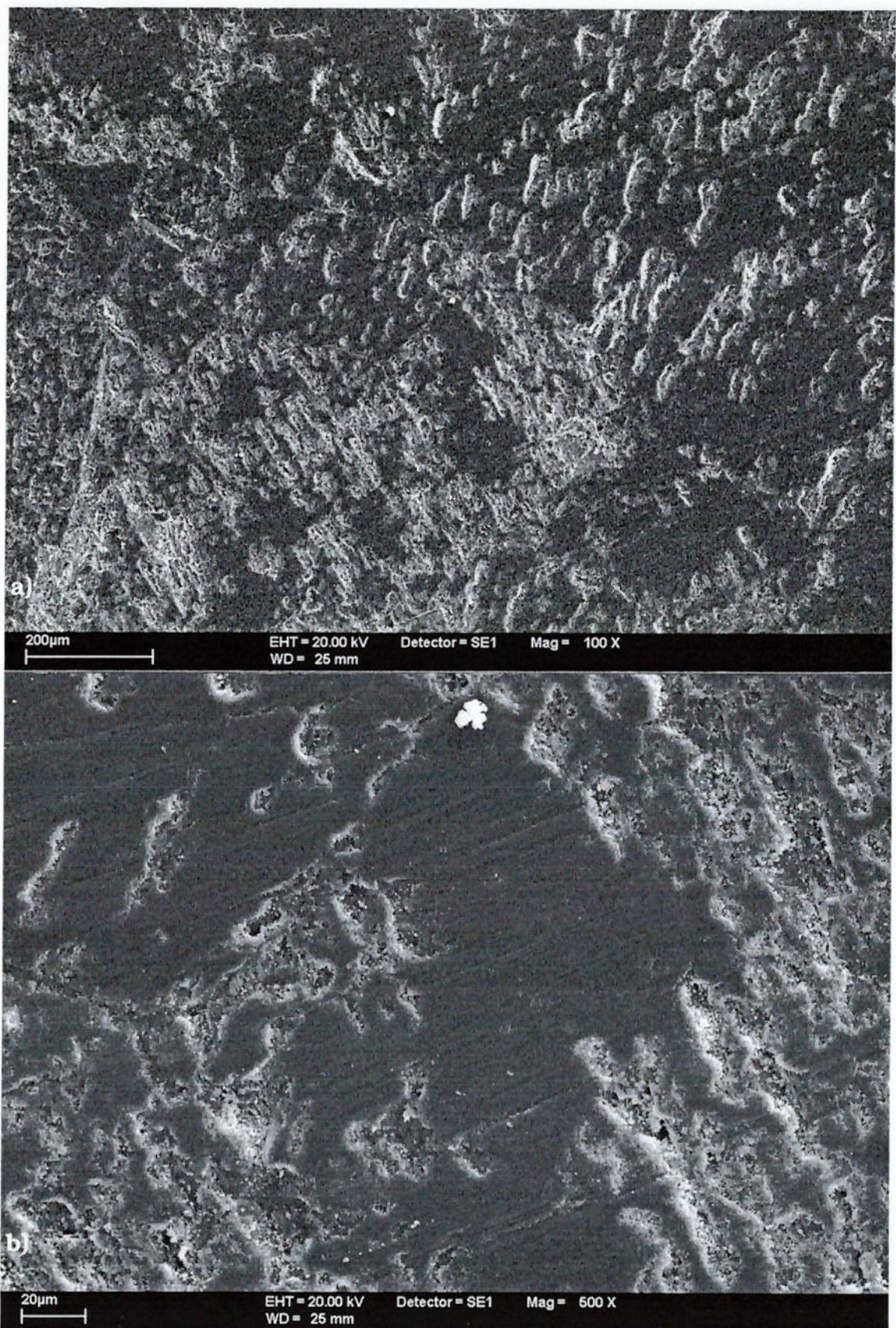


Figura 38 — Fotomicrografias da superfície do mármore Branco Campos do Jordão submetida à lixa de granulometria 400 (superfície semi-lustrosa): **a)** aumento de 100 vezes; **b)** aumento de 500 vezes.

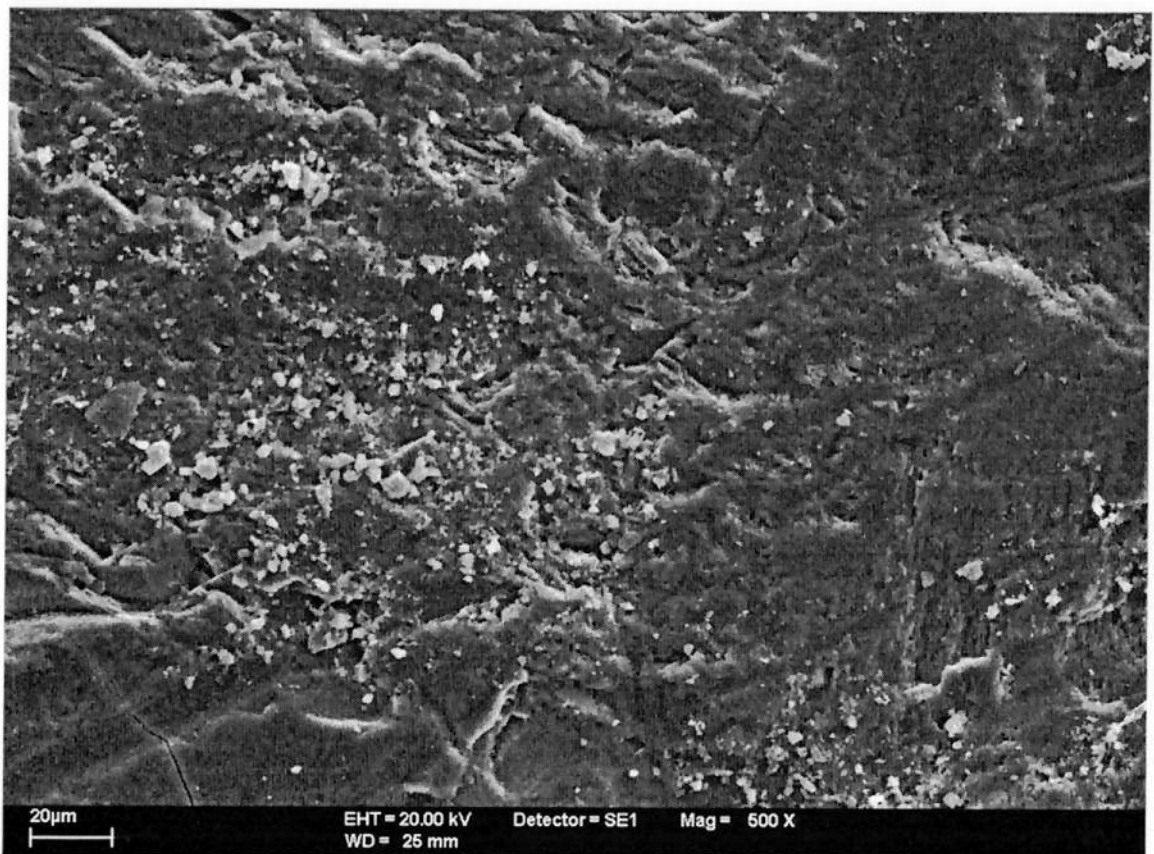


Figura 39 — Fotomicrografia da superfície polida do mármore Branco Campos do Jordão.

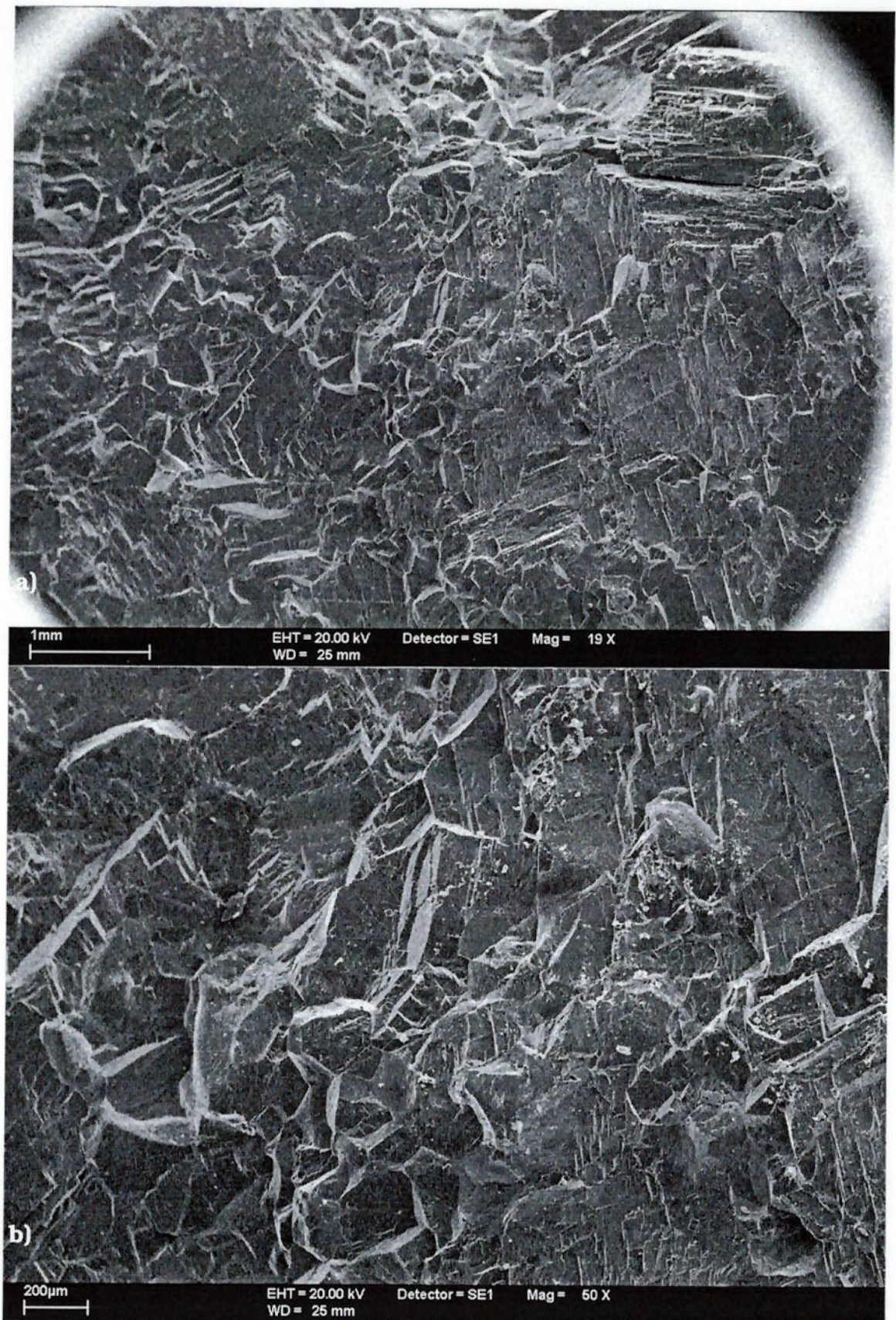


Figura 40 — Fotomicrografias da superfície do mármore Branco Campos do Jordão fraturada.
a) aumento de 19 vezes; b) aumento de 50 vezes.

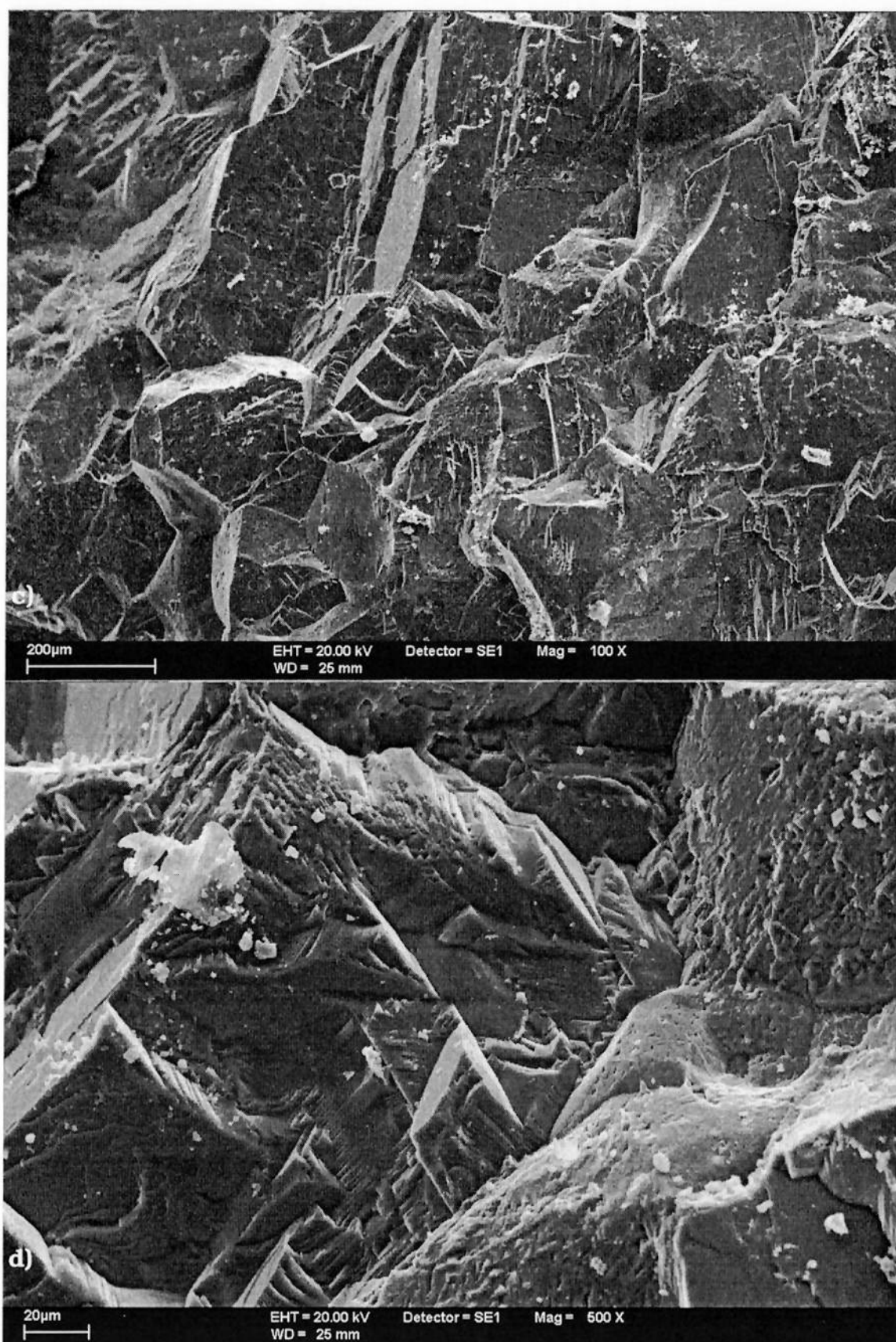


Figura 40 — Fotomicrografias da superfície do mármore Branco Campos do Jordão fraturada (continuação).
c) aumento de 100 vezes; **d)** aumento de 500 vezes.

8. Conclusões

Procuramos, através desta dissertação, mostrar a aplicabilidade do processo de corte por jato d'água abrasivo nas rochas ornamentais brasileiras. Ficou claro o bom desempenho do equipamento utilizado, porém o experimento comprovou a necessidade de estudos sistemáticos acerca deste novo método de corte. Através da variação dos inúmeros parâmetros envolvidos no processo, e observando os resultados obtidos em diversos tipos de rochas ornamentais, é possível chegar a valores otimizados destes mesmos parâmetros, ou mesmo a números de maquinação específicos para cada rocha. Este valores podem representar uma maior eficiência de corte, resultando em um processo mais econômico e com maior qualidade de corte.

No que diz respeito ao acabamento ou polimento das rochas ornamentais, gostaríamos de fazer uma recomendação: que seja normalizada (talvez de acordo com a norma terminológica italiana "UNI EDL 0083", descrita no capítulo anterior) a terminologia a ser utilizada para a descrição da qualidade da superfície das rochas ornamentais, antes, durante ou após o processo de polimento. A norma citada é muito prática, pois qualquer marmorista pode, de posse de uma folha de lixa, mostrar como seria a superfície de uma amostra de rocha ornamental polida naquela granulometria.

Por fim, esperamos que a presente dissertação tenha fornecido os principais elementos para a compreensão dos princípios que envolvem o processo de corte de rochas por jato d'água abrasivo. Esperamos, ainda, que esses elementos possam ser utilizados em futuros estudos e pesquisas sobre este método não convencional de corte.

9. Referências Bibliográficas

- ABDEL-RAHMAN, A. A.; EL-DOMIATY, A. A. Maximum depth of cut for ceramics using abrasive waterjet technique. *Wear*, v. 218, n. 2, p. 216-22, July 1998.
- AGUS, M.; BORTOLUSSI, A.; CICCUCO, R. Influenza delle caratteristiche dell'abrasivo nel taglio del granito con getto d'água. In: CONGRESSO ITALO BRASILIANO DE INGEGNERIA MINERARIA, 3., Verona, 1994. *Anais*. Bolonha, Associazione Nazionale Ingegneri Minerari, 1994. p. 315-9.
- AGUS, M.; BORTOLUSSI, A.; CICCUCO, R.; KIM, W.; VARGIU, A. Abrasive performance in rock cutting with AWJ and ASJ. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 8., Houston, 1995. *Proceedings*. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1995. v. 1, p. 31-47.
- ALITAVOLI, M.; MCGEOUGH, J. A. An expert process planning system for meat cutting by high pressure water-jet. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 84, n. 1-3, p. 130-5, Dec. 1998.
- AROLA, D.; RAMULU, M. Material removal in abrasive waterjet machining of metals. A residual stress analysis. *Wear*, v. 211, n. 2, p. 302-10, Nov. 1997.
- ATANOV, G. The impulsive water jet is a qualitatively new machine for rock breaking. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 6., Houston, 1991. *Proceedings*. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1991. p. 103-26.
- ATANOV, G. A.; GESKIN, E. S. Peculiarities of interactions of unsteady water jets with targets. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 9., Dearborn, 1997. *Proceedings*. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1997. v. 1, p. 441-8.
- BORN, H.; SOARES, L.; BRAGA, J. M. Caracterização tecnológica dos materiais de construção de jazida localizada em área urbana. *Revista da Escola de Engenharia*, p. 323-31, 1996. Número especial.

- BORTOLUSSI, A.; CICCU, R.; KIM, W.; MANCA, P. P.; MASSACCI, G. Jet power optimization in granite kerfing using oscillating nozzles. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 6., Houston, 1991. *Proceedings*. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1991. p. 71-85.
- BURNHAM, C.; SEPE, R. Environmental and safety attributes of waterjet cutting. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 7., Seattle, 1993. *Proceedings*. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1993. v. 2, p. 697-700.
- CARUSO, L. G., coord. *Catálogo das rochas ornamentais do estado de São Paulo*. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1990.
- CHAHINE, G. L.; KALUMUCK, K. M.; FREDERICK, G. S. The use of self-resonating cavitating water jets for rock cutting. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 8., Houston, 1995. *Proceedings*. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1995. v. 2, p. 765-78.
- CHAO, J.; GESKIN, E. Experimental study of the striation formation and spectral analysis of the abrasive waterjet generated surfaces. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 7., Seattle, 1993. *Proceedings*. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1993. v. 1, p. 27-41.
- CORTES, G. R. M.; LAUAND, C. T.; HENNIES, W. T.; CICCU, R. Abrasives in water jet cutting systems. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MINE PLANNING AND EQUIPMENT SELECTION, 9., Atenas, 2000. *Proceedings*. Rotterdam, Balkema, 2000. p. 641-5.
- GIVEN, I. A. *Mining engineering handbook*. Nova York, AIME, 1973. v. 2.
- HASHISH, M. Abrasive jets. In: LABUS, T. J., ed. *Fluid jet technology: fundamentals and application*. 4. ed. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1999. Section 4.0, p. 4.1-2.52.
- HASHISH, M. Prediction models for AWJ machining operations. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 7., Seattle, 1993. *Proceedings*. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1993. v. 1, p. 205-16.

- HASHISH, M. Waterjet machining tool of the future. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 9., Dearborn, 1997. *Proceedings*. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1997. v. 2, p. 769-82.
- HENNIES, W. T.; STELLIN JÚNIOR, A.; CRETELLI, C. Jet piercing application for red granite block mining in São Paulo, Brazil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MINE PLANNING AND EQUIPMENT SELECTION, 8., Dnipropetrovsk, 1999. *Proceedings*. s.L., National Mining University of Ukraine, 1999. p. 21-6.
- KALUMUCK, K. M.; CHAHINE, G. L.; FREDERICK, G. S. The influence of ambient pressure and nozzle shape on submerged water jet velocity and spreading. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 7., Seattle, 1993. *Proceedings*. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1993. v. 1, p. 251-62.
- KALUMUCK, K. M.; CHAHINE, G. L.; FREDERICK, G. S.; ALEY, P. D. Development of a dynajet cavitating water jet cleaning tool for underwater marine fouling removal. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 9., Dearborn, 1997. *Proceedings*. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1997. v. 2, p. 541-54.
- KATAKURA, H.; MIYAMOTO, H. Waterjet related noise and its countermeasures. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 9., Dearborn, 1997. *Proceedings*. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1997. v. 2, p. 783-97.
- KIM, T.; LABUS, T. *Fluid jet technology: fundamentals and applications*. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1999.
- KOLLÉ, J. J. Development and applications of a hydraulic pulse generator. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 7., Seattle, 1993. *Proceedings*. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1993. v. 1. p. 459-71.
- LAUAND, C. T. Determinação do fluxo de massa de abrasivos. In: HENNIES, W. T.; FUJIMURA, F. *Corte não convencional de materiais*. São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas da EPUSP, 2000. /Apostila da Disciplina de Pós-graduação: Corte não Convencional de Materiais./

- LAUAND, C. T.; MARTÍN CORTES, G. R.; HENNIES, W. T.; CICCU, 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, 6., Calgary, 2000. *Proceedings*. Rotterdam, Balkema, 2000. p. 711-6.
- LI, F.; GESKIN, E. S.; TISMENETSKIY, L. Development of ice jet machining technology. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 8., Houston, 1995. *Proceedings*. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1995. v. 2, p. 671-80.
- LOUIS, H.; MEIER, G.; OHLSEN, J. Analysis of the process output in abrasive water jet cutting. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 8., Houston, 1995. *Proceedings*. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1995. v. 1, p. 137-51.
- MABROUKI, T.; RAISSI, K.; CORNIER, A. Numerical simulation and experimental study of the interaction between a pure high-velocity waterjet and targets: contribution to investigate the decoating process. *Wear*, v. 239, n. 2, p. 260-73, Apr. 2000.
- MARMI ITALIANI. *Guida tecnica*. Roma, Istituto Naz. Commercio Estero, 1982.
- MERLE, C.; BOUIX, M.; SIONNEAU, M.; VASSEUR, J. Performance of HP fluid jet cut food products. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 7., Seattle, 1993. *Proceedings*. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1993. v. 1, p. 103-17.
- MOMBER, A. W.; EUSCH, I.; KOVACEVIC, R. Cutting refractory ceramics with abrasive water jets: a preliminary investigation. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 8., Houston, 1995. *Proceedings*. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1995. v. 1, p. 229-44.
- MOMBER, A. W.; KOVACEVIC, R. *Principles of abrasive water jet machining*. Londres, Springer-Verlag, 1998.
- MORT, G. Results of abrasive water jet market survey. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 8., Houston, 1995. *Proceedings*. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1995. v. 1, p. 259-82.

- NESS, E.; ZIBBELL, R. Abrasion and erosion of hard materials related to wear in the abrasive waterjet. *Wear*, v. 196, n. 1-2, p. 120-5, Aug. 1996.
- NIU, M.; FUKUNISHI, Y.; KOBAYASHI, R. Experimental and numerical studies on the mechanism of abrasive jet cutting. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 9., Dearborn, 1997. *Proceedings*. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1997 v. 1, p. 145-56.
- OHMAN, J. L. Abrasives: their characteristics and effect on waterjet cutting. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 7., Seattle, 1993. *Proceedings*. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1993. v. 1, p. 363-74.
- RADIJKO, B. V. Empirico-analytical investigations of coal seams braking process with plain water jets. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 8., Houston, 1995. *Proceedings*. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1995. v. 2, p. 867-78.
- SAVANIK, R. C. Hydraulic mining. In: LABUS, T. J., ed. *Fluid jet technology: fundamentals and application*. 4. ed. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1999. Section 6.0, p. 6.1-6.12.
- SOARES, L.; FUJIMURA, F.; HENNIES, W. T.; BRAGA, J. M. Continuous mining of sand at São Paulo, Brazil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CONTINUOUS SURFACE MINING 5., Wroclaw, 1998. *Continuous surface mining*. Wroclaw, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wroclawskiej, 1998. p.303-11.
- TAGGART, D. G.; NANDURI, M.; KIM, T. J.; SKEELE, F. P. Evaluation of an accelerated wear test for AWJ nozzles. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 9., Dearborn, 1997. *Proceedings*. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1997. v. 1, p. 239-50.
- VASEK, J.; MARTINEC, P.; FOLDYNA, J.; HLAVÁČ, L. Influence of properties of garnet on cutting process. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 7., Seattle, 1993. *Proceedings*. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1993. v. 1, p. 375-87.
- VASEK, J. High pressure water jet assistance of hard rock cutting process. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 8., Houston, 1995. *Proceedings*. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1995. v. 1, p. 19-29.

- VIJAY, M. M. Fluid mechanics of jets. In: LABUS, T.J., ed. *Fluid jet technology: fundamentals and application*. 4. ed. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1999. Section 2.0, p. 2.1-2.41.
- VIJAY, M. M.; DEBS, E.; PAQUETTE, N.; PUCHALA, R. J.; BIELAWSKI, M. Removal of coating with low pressure pulsed water jets. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 9., Dearborn, 1997. *Proceedings*. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1997. v. 2, p. 563-80.
- VIJAY, M. M.; HU, S. G.; LAI, M. K.Y. Enhancing the performance of cavitating water jets. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 7., Seattle, 1993. *Proceedings*. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1993. v. 1, p. 233-50.
- WU, S. S.; KIM, T. J. An application study of plain waterjet process for coating removal. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 8., Houston, 1995. *Proceedings*. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1995. v. 2, p. 779-92.
- WYATT, P. F.; PETERSON, M. C. Development of water jet cutting in extremely hard granite quarries 10 to 20 feet deep. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 9., Dearborn, 1997. *Proceedings*. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1997. v. 2, 485-96.
- ZENG, J.; KIM, T. J. Machinability of engineering materials in abrasive water jet machining. *International Journal of Water Jet Technology*, v. 2, n. 2, p. 103-10, 1995.
- ZENG, J.; KIM, T. J. An erosion model of polycrystalline ceramics in abrasive waterjet cutting. *Wear*, n. 193, p. 207-17, 1996.
- ZENG, J.; KIM, T. J.; WALLACE, R. J. Quantitative evaluation of machinability in abrasive waterjet machining. *PED*, v. 58, p. 169-79, 1992.
- ZHEN-FANG, L.; CHUAN-LIN, T. Pulsed jet nozzle for oilwell jetting drilling. In: AMERICAN WATER JET CONFERENCE, 7., Seattle, 1993. *Proceedings*. Saint Louis, Water Jet Technology Association, 1993. v. 2, p. 537-48.

Apêndices

Apêndice A

Custos Operacionais

Os valores apresentados a seguir referem-se aos custos operacionais do equipamento localizado no Laboratório de Mecânica de Rochas do Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (marca OMAX, modelo 2652A, de origem norte-americana). Muitos desses valores só puderam ser obtidos no mercado norte-americano. Futuramente, a representação da companhia no Brasil poderá fornecer os valores exatos de manutenção.

Custos operacionais em R\$¹

Abrasivo ²	39,60
Tubo de mistura ³	16,55
Energia elétrica ⁴	3,22
Manutenção da mesa (incluindo as lâminas de apoio) ⁵	2,08
Reposição dos componentes de alta pressão ⁶	7,67
Custo operacional total por hora	69,12

Observações:

1. Para os valores dos componentes importados, como tubo de mistura e reposição dos componentes de alta pressão, utilizou-se o câmbio comercial de 23/02/01 (1 US\$ = R\$ 2,035).

2. Granada obtida na Flow Latino Americana Ltda., representante em São Paulo da empresa norte americana. O custo é de R\$ 2,00 / kg para aquisição de 2 toneladas (transporte não incluso). Para o cálculo, considerou-se o consumo de 5,5 g/s.
3. Vida útil do tubo de mistura estimada em 40 horas. Não inclusos os custos de remessa e taxas de importação.
4. Considerando um consumo de 18 kW e um custo por kWh de R\$ 0,17909 (dados da Eletropaulo de 23/02/01, para fins industriais).
5. Valor obtido no mercado norte americano.
6. Não inclusos os custos de remessa e taxas de importação.

O consumo de água, por ser de pequeno valor, não foi incluso na planilha.

Podemos observar o alto custo envolvido no consumo de abrasivo. Este custo pode ser reduzido se o abrasivo for adquirido em uma quantidade maior. Mesmo assim, reforça a necessidade de utilização de material nacional para este fim.

Apêndice B

Glossário

ASJ — Sigla que significa *Abrasive Suspension Jet*, ou jato abrasivo de suspensão.

AWJ — Sigla que significa *Abrasive Water Jet*, ou jato d'água abrasivo.

Bocal — Ver tubo de mistura.

Cavitação — É o fenômeno da formação de bolhas no jato, devido à rápida variação da pressão dinâmica. Estas bolhas podem conter vapor d'água puro ou gás ou, ainda, uma combinação dos dois.

Diâmetro de foco — É o diâmetro do jato d'água abrasivo quando este atinge o material alvo. Corresponde, aproximadamente, ao diâmetro do bocal ou tubo de mistura.

Fluxo de massa de abrasivo — Quantidade em peso de abrasivo fornecido ao jato d'água em um determinado período de tempo. É geralmente expresso em g/s ou kg/min.

Jato de água oscilante — Jato d'água, geralmente pleno ou puro, com bocal oscilante em sentido perpendicular ao do corte, com o intuito de abrir ranhuras largas no material.

Jato de água pleno — Jato d'água puro, sem abrasivo.

Jato pulsante — É o jato d'água puro composto de pulsos seqüenciais de alta velocidade.

Jóia — Elemento, geralmente de safira ou rubi, com um orifício central, onde é gerado o jato d'água de alta velocidade.

Material alvo — Material a ser cortado pelo jato d'água.

Material friável — Material que pode ser reduzido a fragmentos ou a pó. É o caso das rochas e cerâmicas.

Material maleável — Material flexível, dobrável. É o caso dos metais.

Nível de qualidade de corte — Número adimensional que define o nível de acabamento de uma superfície cortada pelo jato d'água abrasivo.

Número de maquinabilidade — Número adimensional que representa o comportamento de um material quando cortado ou usinado pelo jato d'água abrasivo.

Número de passos — número de vezes que o jato d'água percorre a superfície para cortá-la.

Região de corte liso — Parte superior da face de corte, caracterizada por uma baixa rugosidade.

Região de corte rugoso — Parte inferior da superfície de corte, caracterizada pela presença de estrias ou ondulações.

Tubo de mistura ou bocal — Tubo onde as partículas de abrasivo são aceleradas pelo jato d'água, gerando o jato d'água abrasivo.