

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Dissertação de Mestrado

ESTUDO DO CORTE DE ROCHAS ORNAMENTAIS

UTILIZANDO DISCO DIAMANTADO

Autora: Karina Idemburgo

Orientador: Professor José Ildefonso Gusmão Dutra

Março/2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Karina Idemburgo

ESTUDO DO CORTE DE ROCHAS

ORNAMENTAIS UTILIZANDO DISCO DIAMANTADO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Professor José Ildefonso Gusmão Dutra

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2012

À minha mãe

Imaculada, ao meu esposo João

e à minha filha Laís

AGRADECIMENTOS

Meu eterno agradecimento à Deus, por ter me dado a oportunidade de realizar esse trabalho e me iluminar em todos os meus passos. Agradeço também a todos que contribuíram com esse projeto, em especial:

- Ao meu esposo João Teixeira Nunes, pelo companheirismo e por compreender a importância dessa realização para mim.
- À minha filha Laís Teixeira Idemburgo, que logo após seu nascimento, acompanhou essa minha jornada, me oferecendo muito carinho e alegria.
- Aos meus pais Jorge Idemburgo e Imaculada Conceição Idemburgo, pelas orações, pelo apoio e por sempre acreditarem em meu potencial para realizar meus sonhos.
- Aos professores do Departamento de Engenharia de Minas/UFMG:
 - José Ildefonso Gusmão Dutra, amigo e orientador, responsável em grande parte pela realização desse trabalho. Agradeço pela paciência, pelas sugestões para pesquisa e execução dos testes e pela revisão do texto;
 - Roberto Galéry, por acreditar na realização desse trabalho e pela disponibilidade em ajudar na execução do mesmo;
 - Cláudio Lúcio Lopes Pinto, pela preocupação, pela ajuda para transpor os obstáculos e pelos esclarecimentos;
 - Luiz Cláudio, pelo empréstimo de equipamentos.
- Aos professores do Instituto de Geociências/UFMG: Antônio Wilson Romano e Marcos Santos Campello, pela atenção e pela ajuda nas análises petrográficas.
- À amiga, engenheira geóloga, Stael Lustosa Maciel e seu marido Dilberto, que me auxiliaram na obtenção de amostras de quartzito. Ao José Maria, funcionário da marmoraria, que forneceu essas amostras.
- Ao Engenheiro Mário Cabello pela ajuda nas pesquisas bibliográficas.
- Aos funcionários do Laboratório de Tecnologia de Rochas/UFMG pela colaboração na realização dos testes: Eduardo Alexandrina, Ricardo Damásio, Ricardo Assis, Cleber Flor e David Drumond.

- Ao CPGEM/UFMG pela oportunidade de fazer o mestrado.
- Aos membros do Departamento de Engenharia de Minas/UFMG por me auxiliarem no que foi preciso.
- À Capes pelos 24 meses de bolsa concedida.

SUMÁRIO

Capítulo 1 – Introdução	1
Capítulo 2 – Objetivos	3
Capítulo 3 – Revisão da literatura.....	4
3.1 - Rochas ornamentais	4
3.2 – Classificação das rochas ornamentais.....	5
3.2.1 – Granitos	5
3.2.2 – Quartzitos	8
3.2.3 – Ardósia	11
3.2.4 – Esteatitos (pedra-sabão) e serpentinitos	13
3.2.5 – Mármore.....	14
3.3 – Panorama do setor de rochas ornamentais	14
3.3.1 – Quadro setorial nacional.....	15
3.3.1.1 – Produção nacional	16
3.3.1.2 – Comércio exterior: Importações e exportações	17
3.3.1.3 – Projeções futuras	21
3.4 - Pesquisa geológica e caracterização tecnológica.....	22
3.5 - Lavra.....	27
3.5.1 – Lavra de matacões	28
3.5.2 – Lavra de maciços rochosos.....	30
3.5.2.1 – Lavra tipo fossa e poço	31
3.5.2.2 – Lavra por desabamento	32
3.5.2.3 – Lavra por tombamento	33
3.5.2.4 – Lavra subterrânea.....	38
3.6 – Técnicas de corte para desmonte.....	38
3.6.1 – Corte cíclico	39

3.6.1.1 – Perfuração e explosivo	39
3.6.1.2 – Perfuração contínua.....	40
3.6.1.3 – Divisão mecânica por cunhas	40
3.6.1.4 – Divisão por agentes expansivos	40
3.6.2 – Corte contínuo.....	41
3.6.2.1 – Fio helicoidal e fio diamantado	41
3.6.2.2 – Chama térmica (flame-jet).....	43
3.6.2.3 – Cortador a corrente	43
3.6.2.4 – Jato d’água (waterjet)	44
3.7 - Beneficiamento de rochas ornamentais	45
3.7.1 – Beneficiamento de blocos	45
3.7.1.1 – Serragem em teares	46
3.7.1.2 – Serragem em talha-blocos	48
3.7.2 – Beneficiamento de chapas/placas	49
3.8 – Corte de rochas ornamentais utilizando disco diamantado.....	50
3.8.1 – Disco diamantado.....	50
3.8.1.1 – Processo de fabricação do disco diamantado	52
3.8.2 – Mecanismo de corte de rochas ornamentais com disco diamantado	54
3.8.2.1 – Direção de corte.....	55
3.8.2.2 – Parâmetros de operação de corte	57
3.8.3 – Uso de água no corte no corte.....	62
3.8.4 – Influência das características da ferramenta de corte.....	62
3.8.5 – Desgaste de discos diamantados.....	63
3.8.5.1 – Mecanismo de desgaste de discos diamantados.....	63
3.9 – Propriedades das rochas e o processo de desdobramento.....	65
3.9.1 – Influência das características petrográficas e físicas.....	69
Capítulo 4 – Metodologia.....	72

4.1 - Materiais.....	72
4.2 – Métodos.....	72
4.2.1 – Caracterização tecnológica	73
4.2.1.1 – Análise petrográfica	73
4.2.1.2 – Índices físicos – densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água	73
4.2.1.3 – Desgaste Amsler.....	74
4.2.1.4 – Resistência à compressão uniaxial	76
4.2.1.5 – Resistência à flexão	78
4.2.1.6 – Testes de corte	80
Capítulo 5 – Resultados e discussões.....	86
5.1 – Análise petrográfica.....	86
5.2 – Índices físicos.....	92
5.3 – Desgaste Amsler.....	96
5.4 – Resistência à compressão uniaxial.....	98
5.5 – Resistência à flexão.....	101
5.6 – Ensaio de corte.....	105
5.6.1 – Relação entre energia específica e algumas variáveis.....	109
5.6.1.1 – Profundidade de corte.....	109
5.6.1.2 – Taxa de alimentação	114
5.6.1.3 – Taxa de remoção específica.....	118
5.6.2 – Velocidade periférica	124
5.6.2.1 – Força tangencial	124
5.6.2.2 – Energia específica.....	126
Capítulo 6 – Conclusões.....	130
Capítulo 7 – Relevância dos resultados.....	133
Capítulo 8 – Sugestões para trabalhos futuros.....	134

Capítulo 9 – Referências bibliográficas..... 135

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Granito (amostra utilizada nos testes dessa dissertação).....	6
Figura 3.2: Diagrama ilustrativo da séries dos feldspatos. ((http://www.dicionario.pro.br/dicionario/index.php/Feldspato , acessado em: 28/03/12).....	7
Figura 3.3: Quartzito (amostra utilizada nos testes dessa dissertação).....	9
Figura 3.4: Ardósia, (amostra utilizada nos testes dessa dissertação).....	11
Figura 3.5: Comparação em valor, da exportação brasileira de rochas ornamentais, no período de janeiro a setembro entre anos de 2010 e 2011. ((http://www.abirochas.com.br), acessado em 02/12/2011).....	18
Figura 3.6: Comparação em toneladas, da exportação brasileira de rochas ornamentais, no período de janeiro a setembro entre anos de 2010 e 2011. ((http://www.abirochas.com.br), acessado em: 02/12/2011).....	19
Figura 3.7: Tipos de lavras de rochas ornamentais (CHIODI FILHO, 1995).....	28
Figura 3.8: Lavra de matacões – Guandu/BA (da MATTA, 2007).....	30
Figura 3.9: Lavra em fossa - Cachoeiro do Itapemirim/ES (da MATTA, 2003).....	31
Figura 3.10: Lavra em poço - Cachoeiro do Itapemirim/ES (da MATTA, 2003).....	32
Figura 3.11: Lavra por desabamento (RUSSO, 2011).....	33

Figura 3.12: Seções esquemáticas da lavra por tombamento, em fatias verticais (à esquerda) e em fatias horizontais (à direita) (CHIODI FILHO, 1995).....	34
Figura 3.13: Lavra por bancadas altas. Corte de uma prancha primária – Nova Venécia/ES (da MATTA, 2003).....	35
Figura 3.14: Desdobramento de blocos - Nova Venécia/ES (da MATTA, 2003).....	35
Figura 3.15: Bancadas baixas (da MATTA, 2003).....	36
Figura 3.16: Método de fatias horizontais – Lavra por degraus (RUSSO, 2011).....	37
Figura 3.17: Início de lavra de quartzito azul imperial, executada com fio diamantado - Oliveira dos Brejinhos/BA (da MATTA, 2003).....	38
Figura 3.18: Colocação de explosivo para desmembramento da prancha (REGADAS, 2006).....	39
Figura 3.19: Execução da divisão mecânica por intermédio de cunhas. (REGADAS, 2006).....	40
Figura 3.20: Corte de matacão efetuado com argamassa expansiva – Piranhas/GO. (REGADAS, 2006).....	41
Figura 3.21 Exemplos de fios diamantados (da MATTA, 2003).....	42
Figura 3.22: Cortador a corrente (da MATTA, 2003).....	44
Figura 3.23: Talha-blocos para a produção de ladrilhos (RIBEIRO, 2005).....	46
Figura 3.24: Tear multi-lâminas utilizado no corte de rochas ornamentais (COIMBRA FILHO, 2006).....	47
Figura 3.25: Tear multifios diamantados para o corte de granito (RIBEIRO,	

2005).....	48
Figura 3.26: Extração manual aproveitando-se os planos de fratura do quartzito, usando-se cunha e marreta (esquerda), desdobramento do quartzito (direita) (PIRES, 2007).....	50
Figura 3.27: Polimento de quartzito extraído em Ouro Preto/MG. À esquerda, máquina de polimento manual e à direita, polimento automático (PIRES, 2007).....	50
Figura 3.28: Disco diamantado segmentado (ROBLEDA <i>et al.</i> , 2010).....	51
Figura 3.29: Parte de um disco diamantado segmentado (ROBLEDA <i>et al.</i> , 2010).....	54
Figura 3.30: Processo de fissuração durante um ensaio de microindentação em um material frágil. (SWAIN e LAWN, 1976).....	55
Figura 3.31: A cinemática do processo para: (a) modo up-cutting e (b) modo down-cutting. (BUYUKSAGIS, 2007).....	56
Figura 3.32: Representação gráfica das forças horizontais (F_h) e verticais (F_v) durante o corte para baixo (down-cutting) e para cima (up-cutting). (SUÁREZ DEL RIO <i>et al.</i> , 1998).....	57
Figura 3.33: Cinemática do corte (ERSOY <i>et al.</i> , 2005).....	58
Figura 3.34: Fases que passam os cristais de diamante durante o corte: 1) incluídos na matriz; 2) início da atividade; 3) começo do desgaste; 4) fraturação e 5) arranque. (SUÁREZ DEL RIO <i>et al.</i> 1998).....	64
Figura 4.1: Máquina Amsler (Laboratório de Tecnologia de Rochas – Escola de Engenharia/UFMG).....	75
Figura 4.2: Corpos de prova de quartzito utilizados no teste de compressão uniaxial.....	76

Figura 4.3: Prensa servocontrolada (Laboratório de Tecnologia de Rochas – Escola de Engenharia/UFMG).....	76
Figura 4.4: Corpos de prova de quartzito utilizados no ensaio de resistência à flexão.....	78
Figura 4.5: Corpos de prova de ardósia utilizados no ensaio de resistência á flexão....	79
Figura 4.6: Corpo de prova na prensa para a realização do ensaio de flexão.....	80
Figura 4.7: Serra diamantada (Laboratório de Tecnologia de Rochas – Escola de Engenharia/UFMG).....	81
Figura 4.8: Inversor de frequência.....	82
Figura 4.9: Disco diamantado.....	83
Figura 4.10: Corte de uma amostra de granito.....	83
Figura 5.1: Foto em microscópio sob luz polarizada com aumento de 100 vezes - QOP1.....	86
Figura 5.2: Foto em microscópio sob luz polarizada com aumento de 100 vezes - QOP2.....	88
Figura 5.3: Foto em microscópio sob luz polarizada com aumento de 25 vezes – granito.....	90
Figura 5.4: Foto em microscópio sob luz polarizada com aumento de 100 vezes – ardósia.....	91
Figura 5.5: Densidade aparente seca (à esquerda) e densidade aparente saturada (à direita) para granito, quartzito e ardósia.....	95
Figura 5.6: Porosidade (à esquerda) e absorção d’água (à direita) para granito, quartzito e ardósia.....	95

Figura 5.7: Desgaste Amsler em relação a altura para granito, quartzito e ardósia, considerando após percorrer 500 e 1000m.....	97
Figura 5.8: Corpos de prova rompidos durante o ensaio de resistência à compressão uniaxial.....	98
Figura 5.9: Gráfico tensão x deformação para os corpos de prova 1 (à esquerda) e 2 (à direita) – Ensaio de resistência à compressão uniaxial.....	99
Figura 5.10: Gráfico tensão x deformação para os corpos de prova 3 (à esquerda) e 4 (à direita) – Ensaio de resistência à compressão uniaxial.....	99
Figura 5.11: Gráfico tensão x deformação para o corpo de prova 5 – Ensaio de resistência à compressão uniaxial.....	100
Figura 5.12: Corpos de prova rompidos após o ensaio de flexão – quartzito.....	101
Figura 5.13: Relação força x deslocamento do ensaio de flexão para o quartzito. À esquerda, para o corpo de prova 1 e à direita, corpo 2.....	102
Figura 5.14: Relação força x deslocamento do ensaio de flexão para o quartzito – Corpo de prova 3.....	102
Figura 5.15: Corpos de prova rompidos após o ensaio de flexão – ardósia.....	103
Figura 5.16: Relação força versus deslocamento para o ensaio de flexão da ardósia – corpo de prova 1.....	104
Figura 5.17: Variação da energia específica com a profundidade de corte para quartzito, utilizando-se velocidade periférica de 26,18m/s.....	109
Figura 5.18: Variação da energia específica com a profundidade de corte para quartzito, utilizando-se velocidade periférica de 35,34m/s.....	110
Figura 5.19: Variação da energia específica com a profundidade de corte para quartzito, utilizando-se velocidade periférica de 44,77m/s.....	110
Figura 5.20: Variação da energia específica com a profundidade de corte para granito, utilizando-se velocidade periférica de 26,18m/s.....	111

Figura 5.21: Variação da energia específica com a profundidade de corte para granito, utilizando-se velocidade periférica de 35,34m/s.....	111
Figura 5.22: Variação da energia específica com a profundidade de corte para granito, utilizando-se velocidade periférica de 44,77m/s.....	112
Figura 5.23: Variação da energia específica com a profundidade de corte para ardósia, utilizando-se velocidade periférica de 26,18m/s.....	112
Figura 5.24: Variação da energia específica com a profundidade de corte para ardósia, utilizando-se velocidade periférica de 35,34m/s.....	113
Figura 5.25: Variação da energia específica com a profundidade de corte para ardósia, utilizando-se velocidade periférica de 44,77m/s.....	113
Figura 5.26: Relação entre energia e taxa de alimentação para o quartzito – Profundidade de 1,0cm e velocidade periférica de 26,18m/s.....	115
Figura 5.27: Relação entre energia e taxa de alimentação para o quartzito – Profundidade de 1,5cm e velocidade periférica de 26,18m/s.....	115
Figura 5.28: Relação entre energia e taxa de alimentação para o granito – Profundidade de 1,0cm e velocidade periférica de 26,18m/s.....	116
Figura 5.29: Relação entre energia e taxa de alimentação para o granito – Profundidade de 1,5cm e velocidade periférica de 26,18m/s.....	116
Figura 5.30: Relação entre energia e taxa de alimentação para a ardósia – Profundidade de 1,0cm e velocidade periférica de 26,18m/s.....	117
Figura 5.31: Relação entre energia e taxa de alimentação para a ardósia – Profundidade de 1,5cm e velocidade periférica de 26,18m/s.....	117
Figura 5.32: Relação entre energia específica e taxa de remoção específica para o quartzito, utilizando-se velocidade periférica de 26,18m/s.....	118
Figura 5.33: Relação entre energia específica e taxa de remoção específica para o quartzito, utilizando-se velocidade periférica de 35,34m/s.....	119

Figura 5.34: Relação entre energia específica e taxa de remoção específica para o quartzito , utilizando-se velocidade periférica de 44,77m/s.....	119
Figura 5.35: Relação entre energia específica e taxa de remoção específica para o granito, utilizando-se velocidade periférica de 26,18m/s.....	120
Figura 5.36 Relação entre energia específica e taxa de remoção específica para o granito, utilizando-se velocidade periférica de 35,34m/s.....	120
Figura 5.37: Relação entre energia específica e taxa de remoção específica para o granito, utilizando-se velocidade periférica de 44,77m/s.....	121
Figura 5.38: Relação entre energia específica e taxa de remoção específica para a ardósia, utilizando-se velocidade periférica de 26,18m/s.....	122
Figura 5.39: Relação entre energia específica e taxa de remoção específica para a ardósia, utilizando-se velocidade periférica de 35,34m/s.....	122
Figura 5.40: Relação entre energia específica e taxa de remoção específica para a ardósia, utilizando-se velocidade periférica de 44,77m/s.....	123
Figura 5.41: Relação entre força tangencial e velocidade periférica com todas as profundidades estudadas para o quartzito.....	124
Figura 5.42: Relação entre força tangencial e velocidade periférica com todas as profundidades estudadas para o granito.....	125
Figura 5.43: Relação entre força tangencial e velocidade periférica com todas as profundidades estudadas para a ardósia.....	126
Figura 5.44: Relação entre velocidade periférica e energia específica com todas as profundidades de corte estudadas para o quartzito.....	127
Figura 5.45: Relação entre velocidade periférica e energia específica com todas as profundidades de corte estudadas para o granito.....	127
Figura 5.46: Relação entre velocidade periférica e energia específica com todas as profundidades de corte estudadas para a ardósia.....	128

Figura 5.47: Comparação do consumo de energia dos testes de corte para granito, quartzito e ardósia a profundidade de 0,5cm e velocidade periférica de 26,18m/s..... 129

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1: Tipos de granitos. (adaptado de COSTA <i>et al.</i> , 2001).....	6
Tabela III.2: Etapas de pesquisa para rochas ornamentais (adaptado de da MATTA, 2007).....	27
Tabela III.3: Fatores que afetam a performance da serra circular diamantada. (ERSOY e ATICI, 2004).....	66
Tabela IV.1: Diâmetro e altura dos corpos de prova utilizados no ensaio de compressão uniaxial.....	77
Tabela IV.2: Testes realizados.....	84
Tabela IV.3: Testes realizados para as profundidades 1,0 e 1,5cm.....	84
Tabela V.1: Estimativa visual para a constituição mineralógica da amostra QOP1.....	87
Tabela V.2: Estimativa visual para a constituição mineralógica da amostra QOP2.....	89
Tabela V.3: Índices físicos do quartzito.....	93
Tabela V.4: Índices físicos do granito.....	94
Tabela V.5: Índices físicos da ardósia.....	94
Tabela V.6: Desgaste em mm para quartzito, granito e ardósia.....	97
Tabela V.7: Resultado do teste de compressão uniaxial.....	100
Tabela V.8: Dimensões dos corpos de prova e resultados dos testes de flexão.....	102

Tabela V.9: Dimensões do corpo de prova e resultado do teste de flexão para a ardósia.....	104
Tabela V.10: Testes de corte com o quartzito.....	105
Tabela V.11: Testes de corte com o quartzito para a profundidade de 1,00 e 1,50 cm e velocidade periférica de 26,18m/s.....	106
Tabela V.12: Testes de corte com o granito.....	106
Tabela V.13: Testes de corte com o granito para a profundidade de 1,00 e 1,50 cm e velocidade periférica de 26,18m/s.....	107
Tabela V.14: Testes de corte com a ardósia.....	107
Tabela V.15: Testes de corte com a ardósia para a profundidade de 1,00 e 1,50 cm e velocidade periférica de 26,18m/s.....	108

LISTA DE NOTAÇÕES

A: ampere

cm: centímetro

cm²/min: centímetro quadrado/minuto

cv: cavalo-vapor

g: grama

HP: horse power

Hz: hertz

J: Joule

k: kilo (10^3)

Kg: quilograma

M: mega (10^6)

m: metro

m/min: metros/minuto

m/s: metros/segundo

min: minuto

N: Newton

N.m: Newton-metro

Pa: Pascal

V: Volts

W: Watts

>: maior e <: menor

RESUMO

A demanda por rochas ornamentais tem crescido muito nos últimos anos, tanto para consumo interno, quanto para exportação. Para suprir essa demanda, a produção aumentou, houve também um desenvolvimento tecnológico, porém, é necessário estudos e investimentos nesse setor e aprimoramento das técnicas utilizadas. Pois, em geral, os processos de lavra e beneficiamento ainda são praticados sem planejamento sistemático e controle, resultando em má utilização dos equipamentos, desperdícios, altos custos de produção, problemas de segurança na operação e graves impactos ambientais. O advento das ferramentas diamantadas, utilizadas na lavra e beneficiamento de rochas ornamentais, tem contribuído, em grande parte, para o crescimento do setor, porém, há necessidade de estudos para utilizar essas ferramentas de forma a maximizar a recuperação das rochas, aumentar o lucro e diminuir os aspectos negativos envolvidos abordados anteriormente. O corte de rochas com disco diamantado, considerando uma visão integrada entre as propriedades das rochas, as variáveis envolvidas no corte e o desempenho da máquina, pode contribuir para o aprimoramento das técnicas de beneficiamento. Esse trabalho teve como principal objetivo otimizar as técnicas utilizadas no corte de rochas ornamentais com disco diamantado, utilizando-se alguns valores para as variáveis envolvidas no corte, visando a melhoria da qualidade do produto, menor consumo de energia e prolongamento da vida útil do disco. Três tipos de rocha: quartzito, granito e ardósia, foram cortados, a diferentes velocidades periféricas (26,18; 35,34 e 44,77m/s), com diferentes taxas de alimentação e profundidades de corte (0,5; 1,0; 1,5 e 2,0cm). Com essas variáveis e com outras que foram medidas, foi possível calcular a energia específica consumida em cada teste. Essas variáveis foram relacionadas entre si, com a energia específica e com as propriedades das rochas (petrográficas, físicas e mecânicas). Essa correlação possibilitou analisar quais as propriedades importantes para o corte e comparar as condições de corte para os três tipos de rocha.

Palavras chave: rochas ornamentais, variáveis de corte, energia específica, propriedades das rochas.

ABSTRACT

The demand for ornamental rocks has grown in last years, both to domestic consumption as for export. To supply this demand, the production increased, there was also a technological development, however, is necessary in this sector, studies and investiments and improvements in the techniques used. Therefore, in general, the mining and mineral processing are still practiced without systematic planning and control, resulting in poor utilization of equipments, wastes, high production costs, security problems in the operation and severe environmental impacts. The advent of diamond tools, used in mining and mineral processing of ornamental rocks, has contributed, largely, to the growth of the sector, however, there is necessity of studies to used these tools to maximize the recovery of the rocks, increase the profit and decrease the negative aspects previously discussed. The cutting of rocks with diamond disk, considering an integrated view between the properties of rocks, the variables involved in cutting and machine performance, can contribute to improvement of processing techniques. This work has as main objective to optimize the techniques used in cutting of ornamental rocks using diamond disk, using some values for variables involved in cutting, to improve the product, lower power consumption and extend the life of the disk. Thre types of rock: granite, quartzite and slate, were cut, at different peripheral speeds ((26,18; 35,34 e 44,77m/s), with different feed rates and depths of cut (0,5; 1,0; 1,5 e 2,0cm). With these variables and with others that were measured, it was possible to calculate the specific energy consumption in each test. These variables were related to each other, with the specific energy and with the rock properties (petrographic, physical and mechanical). This correlation allowed to analyze what are the important properties for the cutting and compare the cutting conditions for the three rock types.

Keywords: ornamental rocks, cutting variables, specific energy, rock properties.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A grande expansão da demanda por rochas ornamentais no mundo e, em particular, no Brasil, tem conduzido ao aprimoramento técnico e tecnológico dos processos de extração e transformação. No beneficiamento das rochas ornamentais, o desenvolvimento tecnológico tem considerado basicamente os princípios e técnicas envolvidos nos mecanismos de corte e polimento. Na extração, procura-se evoluir, além das técnicas de desmonte, os processos de lavra, com a finalidade de aumentar a recuperação da lavra. O advento das ferramentas diamantadas, e seu desenvolvimento, foi sem dúvida um marco importante na produção de rochas ornamentais, tanto do ponto de vista econômico, como do ponto de vista da qualidade final dos produtos.

O crescimento da produção de rochas ornamentais no Brasil, associado à falta de planejamento sistemático de lavra e de técnicas de extração e beneficiamento deficientes, do ponto de vista da engenharia, na grande maioria dos casos, tem conduzido a custos operacionais elevados, problemas de segurança de operação e a graves danos ambientais.

Todos esses problemas causados pelo aumento significativo da produção de rochas ornamentais têm sido motivo de preocupação constante para os órgãos estatais de controle. Tendo em vista a importância econômica que a produção desses bens minerais tem representado para o Brasil, esses órgãos governamentais de controle têm procurado estimular o aperfeiçoamento dos processos de extração e beneficiamento das rochas ornamentais.

Em função dessa demanda por melhorias nos processos de extração e beneficiamento das rochas ornamentais, as universidades e centros de pesquisa têm desenvolvido muitos projetos de pesquisa financiados por órgãos de fomento ou em parceria com empresas interessadas. Tais projetos visam melhorias nos processos de extração com a finalidade de aumentar a recuperação na lavra, tornando as operações mais seguras além de reduzir o passivo ambiental gerado. No beneficiamento, as técnicas de corte são estudadas na busca pela otimização dos processos.

No corte de rochas ornamentais com ferramentas diamantadas se produzem dois fenômenos recíprocos: a ferramenta diamantada corta a rocha, porém, por sua vez, a rocha desgasta a ferramenta (SUÁREZ DEL RIO *et al.*, 1998). Por isso, é importante estudar a influência das características das rochas em sua cortabilidade e as condições ótimas dos parâmetros envolvidos no corte para que se aumente a vida útil da ferramenta.

Outros aspectos também devem ser levados em consideração como a utilização do diamante nos dispositivos de corte e polimento da rocha, isso pode ser considerado o avanço mais importante no desenvolvimento das técnicas de extração e beneficiamento das rochas ornamentais. Na extração, o fio diamantado possibilitou uma melhoria significativa no corte da rocha minimizando as perdas e aumentando a velocidade de corte. No beneficiamento, a utilização do fio diamantado nos teares, do disco diamantado para o corte de placas e dos abrasivos diamantados no desbaste e polimento proporcionaram uma evolução extraordinária nos processos de produção. As operações tornaram-se mais rápidas e precisas melhorando a qualidade dos produtos com um considerável aumento no aproveitamento da matéria prima.

O beneficiamento de rochas ornamentais compreende uma sucessão de etapas, que se inicia com a serragem dos blocos em chapas e termina com o polimento e corte dessas chapas. Neste trabalho foram analisados os vários aspectos envolvidos no corte com disco diamantado.

CAPÍTULO 2 - OBJETIVOS

O objetivo desse projeto foi buscar a otimização das técnicas de corte de rochas ornamentais visando:

O aprimoramento das técnicas utilizadas no corte com disco diamantado;

A adequação dos parâmetros envolvidos;

A melhoria de qualidade do produto;

O aumento da vida útil da serra e a diminuição da energia consumida.

Na busca por este objetivo pretendeu-se:

Avaliar o consumo de energia;

Considerar a taxa de desgaste da serra e a energia específica de corte como critérios de performance para otimização da velocidade de corte;

Estudar as variáveis envolvidas no corte;

Caracterizar as rochas utilizadas nos experimentos, do ponto de vista de suas propriedades físico-químicas e geomecânicas, que possam ser relacionadas com os processos envolvidos no corte.

CAPÍTULO 3 – REVISÃO DA LITERATURA

3.1 – Rochas Ornamentais

As rochas ornamentais são tipos litológicos que podem ser extraídos em blocos ou placas, são cortados em diversas formas e beneficiados através de esquadrejamento, polimento e lustro (COSTA, *et al.*, 2001).

Do ponto de vista comercial, são basicamente classificadas em mármore e granitos e respondem por 90% da produção mundial de rochas ornamentais. Os demais tipos são ardósias, quartzitos, pedra-sabão, serpentinitos, basaltos e conglomerados (RODRIGUES e FERRAZ, 2009).

As características dessas rochas são importantes na sua avaliação econômica para o setor de rochas ornamentais e de revestimento. A resistência e grau de alterabilidades dessas rochas são determinados pelas feições estruturais, composicionais e mineralógicas. A estrutura das rochas tais como o desenvolvimento de estruturas planares e de foliações, pode ser modificada devido à presença de filossilicatos, a existência de bandamentos e a atuação de processos deformacionais são relacionados com eventos tectônicos.

A variação do conteúdo mineralógico, do tamanho, da forma e dos arranjos dos grãos minerais que compõem as rochas ornamentais e de revestimento, determina o enquadramento por classe, bem como a indicação para uma correta aplicação da rocha. Estas rochas podem conter cristais uniformes, podem se caracterizar pela presença de cristais de tamanhos variados, irregulares ou não. Essas diferenças resultam da atuação de processos envolvendo diferentes graus de cristalização, recristalização, seleção e transporte.

Conjuntos de cristais mal selecionados, arranjos romboédricos em lugar dos cúbicos, a presença de grãos irregulares ou não, podem apresentar variações significativas na resistência à compressão e à flexão, com grande variação dessas resistências para

diferentes índices de porosidade. Essas variações são importantes para a determinação da aplicação dessas rochas.

Cerca de 80% da produção mundial é atualmente transformada em chapas e ladrilhos para revestimentos, 15% desdobrada em peças para arte funerária e 5% para outros campos de aplicação. Aproximadamente 60% dos revestimentos referem-se a pisos, 16% a fachadas externas, 14% a interiores e 10% a trabalhos especiais de acabamento.

Os blocos extraídos nas pedreiras têm volume variável entre 5m^3 e 8m^3 , podendo atingir, excepcionalmente, 12m^3 . Materiais especiais, com alto valor comercial, permitem, no entanto, o aproveitamento de blocos a partir de 1m^3 . As dimensões-padrão especificadas variam de $2,4 \times 1,2 \times 0,6\text{m}$ ($1,73\text{m}^3$) a $3,3 \times 1,8 \times 1,5\text{m}$ ($8,91\text{m}^3$). Rochas com planos preferenciais de partição paralelos, como quartzitos e ardósias, são lavradas pela extração direta de placas no maciço.

3.2 - Classificação das rochas ornamentais

Segundo COSTA *et al.* (2001), as rochas ornamentais podem ser classificadas segundo a composição e a coloração. Baseando-se no conteúdo mineralógico e em critérios composicionais, podem ser classificadas como: Granitos; quartzitos; ardósia, esteatitos (pedra sabão) e serpentinitos; mármore.

3.2.1 – Granitos

O granito é uma rocha magmática de grãos finos, médios ou grossos, composta essencialmente por quartzo, biotita e feldspatos, tendo como minerais acessórios a apatita, magnetita, turmalina e anfibólio, entre outros. Faz parte do conjunto das rochas silicáticas. O granito possui massa específica variável de 2600 a 2850kg/m^3 ; porosidade total em torno de 0,4 a 1,2% (RODRIGUES e FERRAZ, 2009).

O granito (Figura 3.1) é utilizado como rocha ornamental e na construção civil. Para o setor de rochas ornamentais e de revestimento, o termo granito designa um amplo

conjunto de rochas silicatadas, abrangendo monzonitos, granodioritos, charnockitos, sienitos, dioritos, doleritos, basaltos e os próprios granitos.



Figura 3.1: Granito
(Granito utilizado nos testes dessa dissertação)

A partir de análise petrográfica, pode-se afirmar que os granitos comerciais, além de apresentarem granulação variada, não necessariamente correspondem aos denominados granitos verdadeiros e podem envolver os tipos listados na Tabela III.1

Tabela III.1: Tipos de granitos. (adaptado de COSTA *et al.*, 2001)

Tipos petrográficos	Representação	Classificação Industrial
Quartzo-feldspáticos	Granitos verdadeiros	Granito Ruby Red
	Gnaisses migmatíticos ou não	Granito Verde Lavras e Granito Verde Prata
Feldspáticos	Sienitos	Às de Paus
	Anortositos	Granito Azul da Noruega
Máficos	Rochas Básicas: gabro de grão fino	Negro Absoluto
	Basaltos	

Os granitos apresentam coloração variada, isso se deve em grande parte aos processos de alteração de seus constituintes opacos e de minerais máficos e outros minerais como a clorita.

Os feldspatos, de fórmula química geral $(K, Na, Ca)(Si, Al)_4O_8$, são os principais condicionantes do padrão cromático das rochas silicáticas, conferindo as colorações avermelhada, rosada e creme-acinzentada a essas rochas. A cor negra variavelmente impregnada na matriz das rochas silicatadas, é conferida pelos minerais máficos (silicatos ferromagnesianos), sobretudo anfibólios (hornblenda) e micas (biotita). Nos granitos mais leucocráticos (claros), portanto com menor quantidade de minerais ferro-magnesianos, o quartzo e o feldspato compõem normalmente entre 85% e 95% da rocha.

Um diagrama (Figura 3.2) foi desenvolvido para mostrar as possibilidades de existência de um feldspato com fórmula química definida.

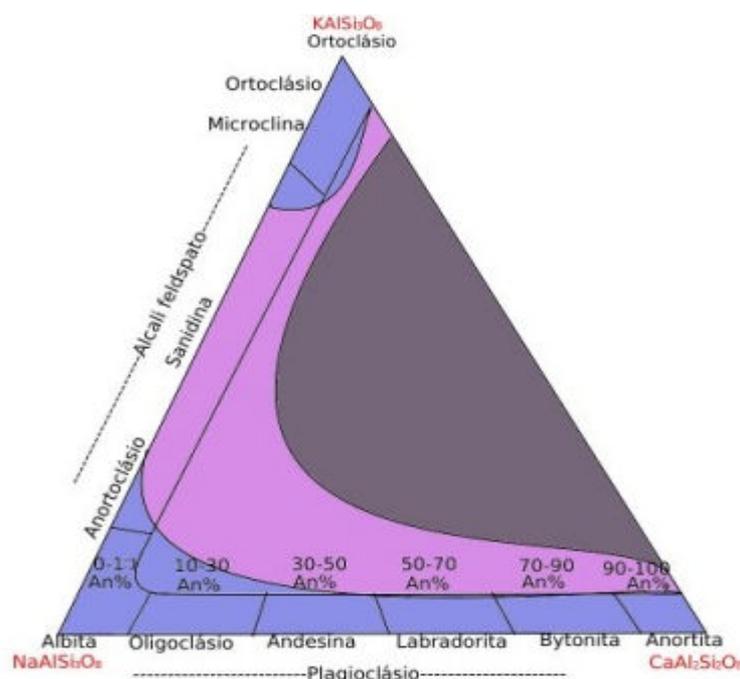


Figura 3.2: Diagrama ilustrativo da séries dos feldspatos

(www.dicionario.pro.br/dicionario/index.php/Feldspato, acessado em: 28/03/12)

Pode ser observado pelo diagrama que os membros finais são representados por , feldspato potássico: ortoclásio; feldspato sódico: albita e feldspato cálcico: anortita. Cada um, com 100% de K, Na ou Ca, respectivamente, ocupando os vértices do triângulo. Na aresta que une ortoclásio e albita, tem-se a série dos feldspatos alcalinos ou alcali-feldspatos. Na aresta entre albita e anortita, tem-se a série dos plagioclásios. Entre anortita e ortoclásio, não há condições de cristalização de feldspatos com essa composição.

Segundo (COSTA *et al.*, 2001), os granitóides, muitas vezes contêm associações minerais muito semelhantes aos granitos, indicando condições de formação muito próximas, podem apresentar uma variedade de estruturas e de conteúdo mineralógico, que associados a outros fatores, fazem com que essas rochas mostrem feições bem diferenciadas e aproveitamentos distintos. Assim, no mercado de rochas ornamentais e de revestimento, rochas geradas através de processos idênticos, recebem denominações diferenciadas por apresentarem padrões estéticos distintos e são comercializadas com grande variação em termos de custos por m².

3.2.2 - Quartzitos

Quartzitos (Figura 3.3) podem ser definidos como rochas metamórficas com textura sacaróide, derivadas de sedimentos arenosos, formadas por grãos de quartzo recristalizados e envolvidos ou não por cimento silicoso. São formados a partir da transformação do arenito. Tanto quanto nos mármore, a recristalização mineralógica ocorre por efeito de pressão e temperatura atuantes sobre os sedimentos arenosos originais, tornando os quartzitos normalmente mais coesos e menos friáveis que os arenitos.

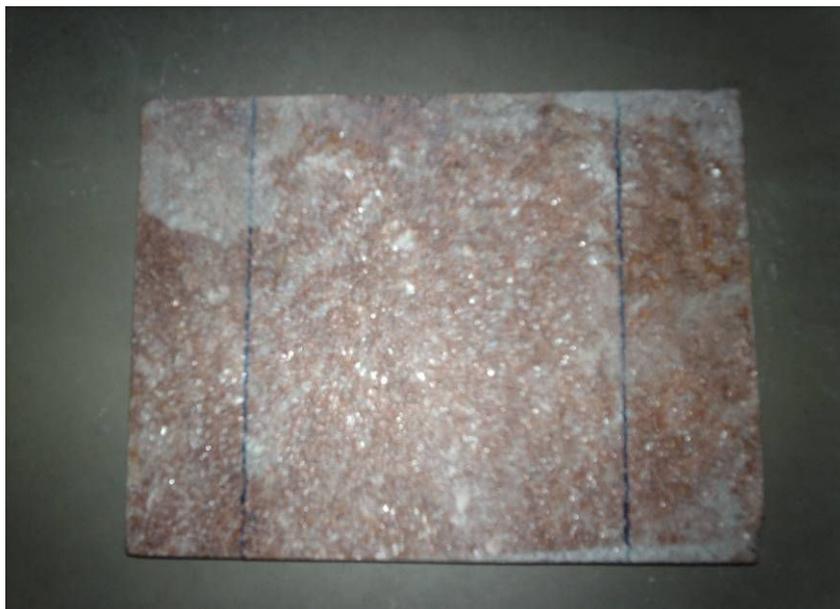


Figura 3.3: Quartzito
(Amostra utilizada nos testes dessa dissertação)

Os quartzitos são formados, essencialmente por grãos de quartzo (finos) fortemente unidos, compactados e duros, contendo fraturas e brilho semelhante ao do quartzo e, em geral, menos nítido, com estrutura maciça ou foliada. Os minerais acessórios mais comuns são as micas (filossilicatos), zircão, magnetita, ilmenita e hidróxidos de ferro e de manganês. Os quartzitos são, em geral, brancos com algumas variações para amarelo, vermelho ou acastanhado. Os quartzitos são comercialmente conhecidos como “Pedra São Tomé ou Mineira” e a sua aplicação pode ser em revestimentos de pisos, muros e paredes.

Alguns quartzitos, devido à concentração de micas, são finamente foliados ou laminados, permitindo com relativa facilidade sua partição através destes planos de fraqueza. A estrutura pode ser também maciça. A estrutura foliada impossibilita sua obtenção como blocos e sua utilização como blocos, são extraídos em placas diretamente dos afloramentos e utilizados como chapas rústicas em revestimento de superfícies.

O maior grau de absorção de água proporcionado pela textura sacaróide, evita o empoçamento de água e facilita a drenagem de pisos externos, sobretudo da borda de piscinas. Além disso, a inexistência de minerais reativos torna os quartzitos inertes a agentes de alteração, como produtos de limpeza e soluções ácidas em geral. Os quartzitos foliados apresentam algumas características particulares como superfícies planas e antiderrapantes, essas propriedades o tornam interessante para serem empregados como revestimento externo e interno de edificações.

Segundo COSTA *et al.* (2001), em função da presença de determinados minerais acessórios, como a dumortierita ou a cianita, ou ainda de minerais opacos alterados, observa-se uma variação na coloração destas rochas entre tons de azul (Quartzito Azul Imperial), cinza azulado (Quartzito Azul) e rosa (Quartzito Rosinha do Serro), respectivamente. Por apresentarem características semelhantes às dos granitos ornamentais, estes quartzitos são descritos comercialmente, com certa frequência, como sendo granitos.

Os quartzitos com alto conteúdo em minerais micáceos (Quartzito São Tomé), em função da posição preferencial destes filossilicatos, podem apresentar foliação até muito bem desenvolvida não permitindo a extração de blocos e o corte regular de chapas. Normalmente, verifica-se uma total falta de padrão e de regularidade nas áreas de extração destes materiais. Nestes casos, a falta de regularidade dos níveis aliada aos métodos não adequados de extração determinam grandes perdas e baixas taxas de aproveitamento para os mesmos.

Encontra-se no mercado tipos quartzosos pouco recristalizados, que a partir de análise petrográfica, podem ser caracterizados como sendo meta-arenitos (Quartzito Rosa Aurora) e ainda aqueles com alto conteúdo em feldspatos, que correspondem a meta-arcósios (Quartzito Pink). Para os quartzitos, as cores variam entre os tons de branco (São Tomé Bianco), rosa (Rosinha do Serro), marrom, azul (Azul Macaúbas) e amarelo (Amaelio São Tomé).

As principais áreas produtoras em Minas Gerais, situam-se nos municípios de São Tomé das Letras e Luminárias, localizados na região sul do estado. Nessas áreas, parte da produção já alcança os mercados europeu e americano. Nas regiões de Ouro Preto, Mariana e Diamantina, verifica-se uma produção irregular e voltada para atender às demandas do mercado interno.

3.2.3 – Ardósia

As ardósias (Figura 3.4) são rochas metassedimentares, de baixo grau metamórfico, de granulação muito fina, formadas a partir do metamorfismo de folhelhos, argilitos e margas. A definição científica de ardósia, baseia-se, entretanto, na presença de planos preferenciais de partição paralelos, que propocionam a “clivagem ardosiana”, devido a presença de filossilicatos (sericita).



Figura 3.4: Amostra de ardósia, mostrando clivagem ardosiana.
(www.rc.unesp.br/museudpm/rochas/index.html, acessado em: 20/08/2011)

Os planos de clivagem são formados pela orientação de minerais placóides prismáticos, compondo uma estrutura xistosa comum a boa parte das rochas metamórficas. A

distinção das ardósias, entre as demais rochas com planos preferenciais de clivagem, é determinada pela sua granulação muito fina e pela maior capacidade de partição em superfícies paralelas. Seus principais constituintes mineralógicos incluem mica branca fina (sericita), quartzo, clorita, óxidos de ferro e pirita.

Sendo essencialmente constituídas por minerais estáveis como o quartzo e filossilicatos (mica branca e clorita), as ardósias são resistentes à meteorização e por isso altamente duráveis. Algumas impurezas, sobretudo as carbonáticas, contribuem para a diminuição de durabilidade, pois são atacadas por soluções ácidas e corroem as ardósias.

As variedades cinza, preta e grafite podem dar origem à ardósia “ferrugem” (nome comercial), como resultado da oxidação de finas lamelas de pirita. Onde são mais espaçados os planos de deslocamento definidos pela clivagem ardosiana, formam-se as ardósias do tipo “matacão”.

O principal produto comercial das ardósias de Minas Gerais, ao qual se remete pelo menos 70% dos 15 milhões de m² de chapas elaboradas anualmente, são as lajotas para revestimento de pisos. O restante da produção é destinado a divisórias, tampos de mesa, pias, mobiliários, telhas, lousas (quadros-negros), artesanato, etc.

Na principal área considerada como de ocorrência de ardósias no Estado de Minas Gerais, situada entre a região de Sete Lagoas ao sul e Pirapora ao norte, constata-se que o metamorfismo não atingiu as condições mínimas para a transformação dos sedimentos ricos em minerais argiláceos em ardósias verdadeiras. Sob o ponto de vista da petrologia, essas rochas não correspondem à ardósias típicas, mas esses materiais têm sido referenciados comercialmente como tal.

A falta de regularidade na espessura de seus níveis, significando excesso de peso para as chapas, a presença de intercalações com composição quartzosa e métodos inadequados de extração, impedem aplicações destes materiais, enquanto material de cobertura e a obtenção de taxas mais altas de aproveitamento do material extraído (COSTA et. al, 2001).

3.2.4 - Esteatitos (Pedra Sabão) e serpentinitos

O serpentinito é produto da atuação de processos aloquímicos ou deutéricos em rochas ultrabásicas, tais como dunitos e peridotitos, que resultam em modificações químicas e em transformações mineralógicas com substituição de olivinas e piroxênios primários por serpentinas, anfibólios, cloritas e carbonato.

Em determinadas áreas, próximas à zonas de cisalhamento, estes serpentinitos são transformados em esteatitos, a partir da reação da serpentina com a sílica, que resulta na formação do talco.

As principais áreas de ocorrência e extração dessas rochas em Minas Gerais, encontram-se localizadas nas regiões de Viriato, Santa Rita de Ouro Preto, Congonhas do Campo e arredores de Ouro Branco.

Grande parte dos esteatitos extraídos destina-se ao mercado interno e é utilizada para a confecção de diferentes itens de uso doméstico e decorativos. Parte ainda pequena da produção destina-se à confecção de lareiras, que são exportadas para os mercados europeu e americano. O serpentinito tem sido utilizado como material de revestimento e enfrenta a concorrência de produtos indianos e italianos.

No passado, esses materiais, em especial os esteatitos, foram utilizados como edificações de importantes monumentos. São inúmeras as igrejas de Minas Gerais com pisos de serpentinito e detalhamento em pedra sabão (COSTA, *et al.*, 2001).

Geralmente, essas rochas são denominadas comercialmente de forma incorreta como sendo granitos. A crescente demanda por estes materiais e a significativa participação de serpentinitos de origem indiana e italiana no mercado brasileiro (Granito Verde Rajasthan e Verde Alpi), justificam o desenvolvimento da pesquisa para estes materiais.

3.2.5 - Mármore

Assim como os quartzitos, os mármore têm suas feições texturais fortemente influenciadas por transformações metamórficas (COSTA, *et al.*, 2001). Em função do grau metamórfico, estas rochas apresentam granulação variando de fina a média. Tem como minerais acessórios a calcita e dolomita e como minerais secundários quartzo, pirita, feldspato, mica, anfíbolios, diopsídio, entre outros. Com qualificação ornamental ou de revestimento, destacam-se os tipos de grão fino, com larga aplicação no setor estatutário. Os mármore apresentam massa específica de 2,40 a 2,80 kg/dm³ e porosidade total entre 5,0 a 12,0%.

Dentre os diversos tipos disponíveis no mercado, podem ser destacados os tipos carbonáticos sedimentares e os metamórficos propriamente ditos (calcários/Bege Bahia, dolomitos e mármore/Aurora Pérola). As cores dos mármore são variadas, há tons variando entre o amarelo, o rosa, o salmão, o marrom, e outros.

No Estado de Minas Gerais destaca-se, atualmente, a produção de mármore nas regiões de Cachoeira do Campo (Mármore Aurora Pérola, Jacarandá, etc.) e de Campos Altos (Mármore Preto Florido e Verde Jaspe).

3.3 - Panorama do setor de rochas ornamentais

Segundo dados da ABIROCHAS (2011), a produção mundial noticiada de rochas ornamentais e de revestimento é de aproximadamente 55 milhões de toneladas/ano. Em 2007, houve um novo salto na produção mundial de rochas ornamentais, atingindo 103,5 milhões de toneladas (RODRIGUES e FERRAZ, 2009). Cerca de 70% da produção mundial é transformada em chapas e ladrilhos para revestimentos, 15% é desdobrada em peças para arte funerária, 10% para obras estruturais e 5% para outros campos de aplicações. O consumo de rochas é estimado em 600 milhões de m²/ano. Estima-se para 2025 a quintuplicação do consumo mundial e transações internacionais (ABIROCHAS, 2011).

Tomando-se como base os anos entre 2004 a 2008, a produção da China, Índia, Itália, Espanha, Brasil, Irã e Turquia correspondeu de 65 a 70% da produção mundial de rochas ornamentais. A Itália é um dos maiores produtores, maior importadora de matéria-prima e maior consumidora per capita e maior exportadora de rochas, bens de capital e tecnologia. Observou-se uma queda acentuada de participação da Itália no comércio de rochas processadas, sobretudo devido ao crescimento da Índia e particularmente da China no mercado asiático, ao longo da década de 90.

Os EUA, seguidos do Japão, são por sua vez os principais importadores de produtos acabados, tendo respondido por 32,6% em peso das transações mundiais em 1999. A China é a maior importadora de máquinas e equipamentos, tendo absorvido quase 10% em peso do total comercializado no mercado internacional em 1999. A participação brasileira no mercado internacional de rochas processadas é ainda limitada e está bastante longe da posição da China e Índia, nossos principais concorrentes.

Segundo dados informados por RODRIGUES e FERRAZ (2009), houve uma taxa de crescimento de 6 a 8% entre 1986 e 1994, na produção de rochas ornamentais devido à disseminação de novas tecnologias de extração e beneficiamento e pelas suas características tecnológicas.

O Brasil e outros países como Itália, China, Espanha, Grécia, Índia e Portugal são os principais produtores de rochas ornamentais no mundo.

3.3.1 – Quadro setorial Nacional

Segundo ABIROCHAS (2011), o Brasil produz 500 variedades comerciais de rochas, entre granitos, mármore, ardósias, quartzitos, travertinos, pedra sabão, basaltos, serpentinitos, conglomerados, pedra talco e materiais do tipo pedra Miracema, pedra Cariri e pedra Morisca, derivadas de quase 1.300 frentes de lavra. Os granitos perfazem cerca de 60% da produção brasileira, enquanto 20% são relativos a mármore e travertinos e quase 8% a ardósias.

O consumo interno aparente de rochas ornamentais e de revestimento no Brasil é estimado em 50 milhões de m²/ Ano, equivalentes a 25kg per capita.

Houve uma expansão na produção de rochas ornamentais no Brasil, entre os anos de 2000 a 2007 para atender à demanda do mercado externo (inclusive norte-americano), mas em 2007, a crise nos EUA afetaram o consumo de rochas desse setor. Nesse mesmo ano, observou-se o aumento do consumo interno de rochas ornamentais, devido ao lançamento do PAC (Programa de Aceleração do Crescimento) e crescimento da construção civil.

O setor brasileiro de rochas ornamentais movimenta cerca de US\$ 2,1 bilhões/ano, incluindo-se a comercialização nos mercados interno e externo e as transações com máquinas, equipamentos, insumos, materiais de consumo e serviços, gerando cerca de 105 mil empregos diretos em aproximadamente 10.000 empresas.

O desdobramento dos blocos de rochas ornamentais no Brasil é feito principalmente através da utilização de teares. Utiliza-se no parque de beneficiamento quase 1.600 teares e tem capacidade de serragem estimada em 40 milhões de m²/ano.

3.3.1.1 - Produção Nacional

Extraí-se no Brasil cerca de 5,2 milhões de toneladas/ano. O Estado do Espírito Santo é o principal produtor, com 47% do total brasileiro, seguido do estado de Minas Gerais o qual responde pela maior diversidade de rochas extraídas (granitos, quartzitos, ardósia e pedra-sabão).

Houve um crescimento expressivo das exportações brasileiras de ardósias e quartzitos foliados, bem como a participação de pedra sabão e serpentinitos nas exportações. Tais materiais, caracterizados pela produção e beneficiamento regionalizados, já representaram 13,6% em valor e 10,4% em peso das exportações brasileiras de rochas no ano 2000.

As exportações do Espírito Santo, Minas Gerais e Bahia, que são os principais estados produtores, totalizaram cerca de US\$ 210 milhões em 2000. O Espírito Santo consolidou sua posição de principal produtor e exportador, respondendo no ano de 2000 por 44%, em peso e valor, do total das exportações brasileiras. O Rio de Janeiro teve um dos mais expressivos crescimentos de exportação de rochas processadas.

O melhor desempenho dos estados do Espírito Santo e do Rio de Janeiro com exportação de rochas graníticas processadas, bem como de Minas Gerais com ardósias e quartzitos foliados, está ligado à existência de parques industriais de beneficiamento e em uma base de competitividade firmada para produtos acabados/semi-acabados no mercado interno. Tais atributos acabaram por viabilizar até o incremento das exportações de blocos de granito pelo Estado do Espírito Santo, exportações estas, agora não controladas por grandes contratos de exclusividade (Abirochas, 2011).

No estado de Minas Gerais, destaca-se a produção de maciços granitóides. Com suas principais ocorrências localizadas na região nordeste, sudeste e sudoeste, o estado detém a posição de maior produtor de granito não beneficiado do país. Os depósitos de rochas quartzíticas, as pequenas lentes de mármore, as raras ocorrências de esteatitos (pedra-sabão), de serpetinitos e os grandes depósitos de materiais descritos comercialmente como ardósias, integram o conjunto das rochas ornamentais mineiras.

3.3.1.2 - Comércio exterior – Importações e exportações

No Brasil, o principal mercado de rochas ornamentais e de revestimento é o mercado externo, principalmente o mercado norte americano que importa chapas polidas. Granitos clássicos têm sido aceitos de forma crescente no mercado mundial, granitos de diferentes tonalidades e os denominados “exóticos”, são um diferencial para o Brasil no mercado externo.

- **Exportações**

Historicamente, Itália e Espanha consumiram, em média, 65% das rochas ornamentais

brasileiras exportadas. Mas com a modernização do parque industrial brasileiro, investimento em tecnologia, diversificação do mercado e melhor qualidade do produto final, os Estados Unidos apresentam maior importância a cada ano, no consumo das rochas ornamentais brasileiras.

No período de 1998 a 2007 houve um crescimento substancial nas exportações de rochas ornamentais. As novas tecnologias de extração e de beneficiamento, que viabilizaram a extração de granitos, contribuíram para o salto qualitativo e quantitativo das exportações de rochas ornamentais.

O Brasil alcançou um faturamento de US\$ 760,07 milhões, no período de janeiro a setembro de 2011. Em relação ao mesmo período em 2010, a variação foi positiva (5,17%) em relação ao faturamento e 0,78% em relação ao volume (Figuras 3.5 e 3.6).

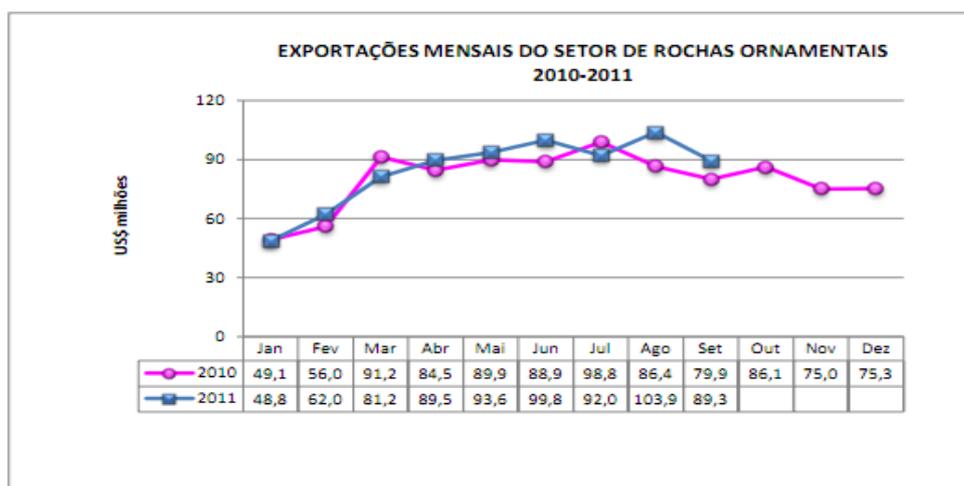


Figura 3.5: Comparação em valor, da exportação brasileira de rochas ornamentais, no período de janeiro a setembro entre anos de 2010 e 2011. (<http://www.abirochas.com.br>, acessado em: 02/12/2011)

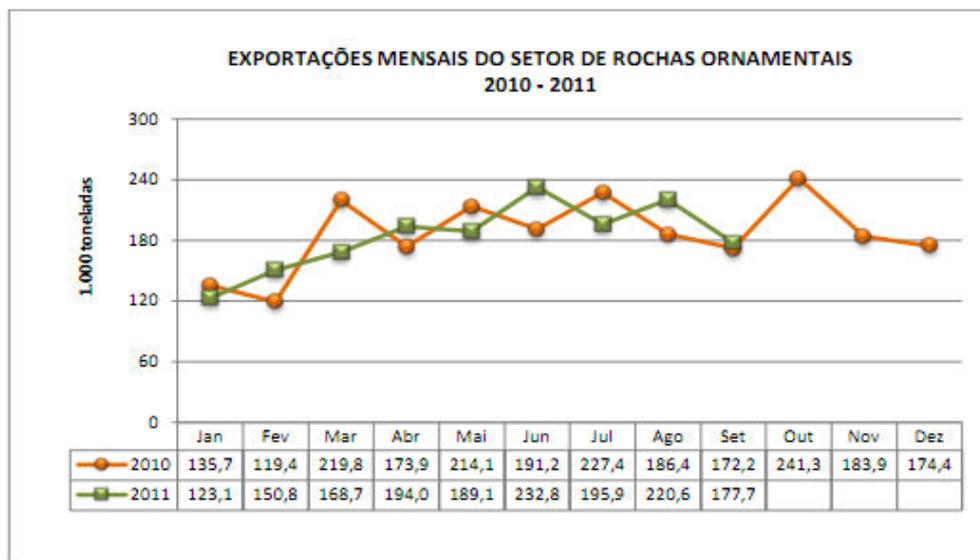


Figura 3.6: Comparação em toneladas, da exportação brasileira de rochas ornamentais, no período de janeiro a setembro entre anos de 2010 e 2011. (www.abirochas.com.br, acessado em: 02/12/2011)

Em 1999, a participação do Brasil nas exportações mundiais de rochas carbonáticas brutas (blocos de mármore) foi de 0,3%, de 9,9% de rochas silicáticas brutas (blocos de granito), de 1,3% nas rochas processadas simples (pedras de calcetar, de 1,4% nas rochas processadas especiais (produtos de mármore e granito) e 5,6% nas ardósias, compondo 4,9% do volume físico do intercâmbio mundial.

O Brasil ficou posicionado como o sexto maior exportador mundial de rochas em volume físico, atrás da Itália, China, Índia, Espanha e Portugal e à frente da África do Sul, Turquia, Coreia do Sul, Grécia, Finlândia e Alemanha. Quanto às exportações de granitos brutos, o Brasil colocou-se em quarto lugar com 9,9%, atrás da Índia (18,2%), África do Sul (11,7%) e China (10,4%), situando-se em 12º lugar das exportações mundiais de rochas processadas.

Houve um expressivo crescimento das exportações brasileiras de ardósias e quartzitos foliados, bem como a participação de pedra sabão e serpentinitos nas exportações. Tais materiais, caracterizados pela produção e beneficiamento regionalizados, já

representaram 13,6% em valor e 10,4% em peso das exportações brasileiras de rochas no ano 2000.

As exportações dos principais estados produtores: Espírito Santo, Minas Gerais e Bahia, totalizaram cerca de US\$ 210 milhões em 2000. O Espírito Santo consolidou sua posição de principal produtor e exportador, respondendo no ano de 2000 por 44%, em peso e valor, do total das exportações brasileiras.

O melhor desempenho do Espírito Santo e do Rio de Janeiro com exportação de rochas graníticas processadas, bem como de Minas Gerais com ardósias e quartzitos foliados, se deve à existência de parques industriais de beneficiamento e em uma base de competitividade firmada para produtos acabados/semi-acabados no mercado interno. Tais atributos acabaram por viabilizar até o incremento das exportações de blocos de granito pelo Estado do Espírito Santo.

- **Importações**

Historicamente, observa-se que o Brasil não é um grande importador de rochas ornamentais. Os países de onde o Brasil mais importa rochas ornamentais são Itália e Espanha.

No período de janeiro a setembro de 2011, as importações brasileiras de rochas ornamentais somaram US\$ 51,15 milhões e 79.571,97 t, com variação positiva de respectivamente 41,7% e 21,8% se comparado ao mesmo período de 2010. Cerca de 57% do volume importado corresponde à chapas de rochas carbonáticas e 19% a blocos dessas rochas. As importações de materiais rochosos aglomerados somaram US\$ 21,3 milhões e 22.108,16 t, com variação positiva de respectivamente 19,1% e 8,3% frente a 2010.

3.3.1.3 - Projeções futuras

Com o objetivo de atender a demanda projetada para 2015, será necessário atingir uma produção primária de blocos da ordem de 14 milhões t/ano, o que representa um incremento de 3,5 vezes a atual produção.

É necessário a modernização do parque industrial brasileiro de beneficiamento para atender à demanda, pois o mesmo encontra-se defasado. A modernização desse parque industrial poderá ser viabilizada através da adequação/automação das máquinas e equipamentos já instalados e com até 10 anos de uso, e sobretudo através da aquisição de bens de capital.

O uso do fio diamantado na lavra é uma tendência que deve ser seguida, permitindo aumentar a recuperação. Há também uma tendência de maior investimento em pesquisa mineral para se ter um melhor conhecimento do maciço rochoso.

O setor de rochas ornamentais é composto por um grande número de pequenas e médias empresas, que têm sua capacidade produtiva prejudicada devido aos impostos e taxas vigentes. Há a necessidade de uma linha de crédito para essas empresas e reformulação das bases tributárias.

Segundo (ABIROCHAS, 2011), a curto e médio prazos aponta-se como relevantes:

- A modernização das marmorarias, como base para o fortalecimento do mercado interno e exportação de produtos finais que agregam serviços, design e marca;
- A capacitação tecnológica da indústria brasileira de máquinas e equipamentos, visando sua adequação qualitativa e quantitativa de atendimento do mercado;
- A qualificação dos insumos e materiais de consumo do beneficiamento, para otimização da serragem e polimento de chapas e lajotas.

A médio e longo prazos aponta-se:

- A necessidade de utilização de teares e talha-blocos mais produtivos que os atuais, para adequação do parque industrial brasileiro.

Há necessidade de modificação do atual perfil tecnológico de máquinas e equipamentos ofertadas atualmente pela indústria nacional para suprir a demanda de material e o número crescente de teares e talha-blocos necessários para tal.

A criação de cooperativas de produtores/beneficiadores, montagem de consórcios de exportação, composição de centrais de matérias primas e centrais de beneficiamento, a capacitação de centros de pesquisa para estudos de aproveitamento industrial de resíduos, caracterização tecnológica e diversificação de produtos comerciais, certificação de origem das rochas e aprimoramento de insumos são questões de maior interesse para o desenvolvimento do setor no que diz respeito à articulação dos arranjos produtivos regionais minero-industriais (clusters).

3.4 - Pesquisa geológica e caracterização tecnológica

Segundo CHIODI FILHO (1995), para um trabalho de exploração geológica de rochas ornamentais, deve-se levar em conta todos os segmentos ligados ao setor, tanto de pesquisa geológica, caracterização tecnológica e levra, quanto de transporte e beneficiamento, marketing e comercialização.

Alguns fatores devem ser considerados ao fazer o programa de exploração de uma área, são eles:

- Fatores geológicos;
- Faixas potenciais e forma de distribuição das rochas;
- Vocação dos terrenos para ocorrência dos materiais comuns, clássicos ou excepcionais;
- Feições estéticas esperadas;
- Quadro aproximado de reservas;
- Perspectivas de alteração físico-química dos produtos aplicados;
- Dimensão dos blocos lavráveis;

- Método de lavra adequado;

Tanto nos programas exploratórios regionais quanto na pesquisa de detalhe, os levantamentos geológicos são orientados para a definição de bons materiais, em condições físicas e quantidades adequadas para exploração (CHIODI FILHO, 1995)

CHIODI FILHO (1995) cita que nos programas exploratórios regionais, alguns fatores devem ser levados em conta para começar a exploração de uma área. Esses parâmetros, como cor, estrutura, concentração de matéria orgânica, podem ser característicos de determinada rocha e servirem como guias prospectivos para materiais com características desejáveis. Nessa fase, uso de sensoriamento remoto na exploração permite a representação de zonas homólogas representativas dos principais domínios morfológicos existentes.

Na pesquisa de detalhe, realiza-se a qualificação dos materiais e a viabilização da lavra. Os trabalhos envolvidos são reconhecimento e amostragem dos materiais aflorantes, caracterização petrográfica, caracterização comercial, cálculo de reservas, definição dos métodos de lavra, testes de serragem e polimento, avaliação do mercado dos produtos.

CHIODI FILHO (1995) defende que, nessa fase, os levantamentos geofísicos podem discriminar feições de interesse na avaliação de maciços rochosos, avaliando o estado de fraturamento em profundidade e revelando fraturas concêntricas paralelas/subparalelas ao contorno morfológico do maciço. Segundo o mesmo autor, sondagens rasas (20 a 30 m), e com grande diâmetro, são importantes para a determinação das reservas medidas e também para a observação de aspectos estruturais e estéticos.

A “Guia de Utilização”, documento concedido pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), permite a lavra na fase de pesquisa. A lavra experimental é importante para determinar o índice de recuperação do material aproveitável, fazer testes de beneficiamento e definir a viabilidade econômica do empreendimento e testar o mercado consumidor.

As amostras representativas de uma jazida devem ser submetidas a ensaios de caracterização tecnológica para definir o campo de aplicação dos materiais, segundo padrões normatizados, exigido pelos compradores.

CHIODI FILHO (1995) define seis ensaios mais importantes, denominados “índices de qualidade”:

- Análise petrográfica em seções delgadas e polidas: Para definição da composição em minerais transparentes (silicatos e carbonatos) e opacos (óxidos e sulfetos), classificação da rocha, observação de alterações metassomáticas e intempéricas, bem como anotação de microfissurações;

A análise petrográfica é realizada através de exames macroscópico e microscópico, permite identificar a natureza ou tipo de rocha, os minerais presentes e suas interrelações, o grau de alteração, o estado microfissural dos cristais, sua granulação e textura (tamanho, forma, disposição, contatos, arranjo dos componentes minerais), além de outras características que possam influenciar na durabilidade da rocha.

A análise petrográfica constitui o único método de investigação laboratorial que possibilita a visualização detalhada dos constituintes da rocha, permitindo avaliar as implicações de suas propriedades no comportamento posterior dos produtos aplicados;

- Índices físicos: Determinam a massa específica (densidade), a porosidade aparente e a absorção d'água.

O termo “aparente”, utilizado para a massa específica (densidade) e porosidade, indica que o volume medido para as determinações é relativo ao volume total das amostras analisadas, ou seja, o volume de sólidos mais o volume de espaços vazios.

A massa específica aparente é expressa em g/cm^3 , kg/m^3 ou t/m^3 . A porosidade aparente e absorção d'água são expressas em porcentagem, indicando respectivamente a porcentagem total de espaços vazios em um volume de rocha e a porcentagem de espaços vazios intercomunicantes nesse mesmo volume.

O índice de absorção de água nunca é, portanto, superior ao índice de porosidade aparente, destacando-se que uma rocha com alta porosidade não tem necessariamente alta absorção d'água, pois seus poros e cavidades podem não ser comunicantes.

A massa específica aparente e a porosidade aparente fornecem indicações sobre a resistência físico-mecânica da rocha, mediante esforços compressivos e de flexão. O índice de absorção de água, por sua vez, indica a capacidade da rocha ser encharcada por líquidos.

- Teste de Desgaste Amsler: Mede a resistência do material à solicitação abrasiva (ABIROCHAS, 2011)

A resistência ao desgaste é normalmente proporcional à dureza, na escala de Mohs, dos minerais constituintes da rocha. A textura das rochas constitui, no entanto, um elemento também muito significativo, pois o seu desgaste pode ocorrer tanto por abrasão, quanto por arranque dos constituintes mineralógicos.

- Compressão uniaxial ao natural ou simples: Esse ensaio avalia a resistência das rochas, sobre as quais atuam forças verticais. Ele indica um importante índice de qualidade das rochas.

A deformabilidade é um dos parâmetros mais importantes que governa o comportamento dos maciços rochosos. A deformação na rocha pode ser permanente ou elástica dependendo da intensidade das forças e das características mecânicas da rocha. No caso da deformação elástica, o corpo recupera sua forma original quando deixam de agir as forças aplicadas.

- Resistência á tração na flexão: Esse ensaio procura determinar qual a tensão mínima, ou flexão máxima, que provoca a ruptura de uma placa de rocha quando submetida a esforços de compressão e/ou tração. Avalia a ruptura do material na resistência á ruptura por flexão.

- Coeficiente de dilatação térmica linear: Mede a dilatação do material em condições de temperatura crescente.

da MATTA (2007), elaborou um roteiro técnico para consultores e empreendedores de rochas ornamentais. Esse roteiro tem o objetivo de orientar quanto à pesquisa mineral de rochas ornamentais para se obter um nível de segurança para os resultados do relatório final de pesquisa. O alto índice de relatórios finais de pesquisa reprovados no estado da Bahia, motivou a elaboração de tal roteiro, justifica-se o elevado número de reprovações devido à má qualidade técnica das pesquisas de rochas, a pouca valorização da pesquisa mineral e do profissional competente.

A elaboração desse relatório contou com a participação de técnicos do DNPM e consultores (geólogos), que responderam a questionários técnicos sobre itens necessários ou não no relatório final de pesquisa. As etapas que devem ser seguidas na pesquisa de rochas ornamentais estão apresentadas na Tabela III.2:

Tabela III.2: Etapas de pesquisa para rochas ornamentais (adaptado de da MATTA *et al.*, 2007)

1 - Estudos bibliográficos	Introdução		
	Fisiografia (morfologia, vegetação, drenagem e clima)		
	Infra-estrutura (acesso, energia elétrica, comunicação, água, mão de obra, oficinas, etc)		
	Geologia regional (descrição dos principais ambientes geológicos e litologias)		
	Unidades de conservação ambiental (localização em mapa)		
2 - Metodologia - Trabalhos técnicos realizados	Reconhecimento local (constatação em campo das informações obtidas em escritório)		
	Levantamento topográfico em campo (planialtimétrico na escala de 1:2000 ou maior)		
	Mapeamento geológico/estrutural	Composição da rocha (cor, textura, etc)	
		Morfologia	
		Grau de fraturamento, diques, veios	
		Características do afloramento	
		Relevo	
	Condições de acesso e infra-estrutura disponível		
	Amostragem dos corpos de rocha	Para testes em laboratório (petrografia e testes físicos)	
		Para testes industriais	
		Para testes de mercado	
	Sondagem rotativa a diamante		
	Geofísica		
	Caracterização tecnológica da rocha (apresentar boletins e laudos)	Índices físicos	
		Resistência à abrasão (desgaste Amsler)	
		Análise petrográfica	
		Resistência ao impacto	
Alterabilidade			
Índice de dilatação térmica			
Resistência à flexão			
Resistência à compressão uniaxial			
Testes de beneficiamento			
3 - Cálculo de reservas	Matacão		
	Maciço		
4 - Análise da pré exequibilidade econômica da lavra			
5 - Apresentação do relatório final de pesquisa			
6 - Conclusão			

3.5 - Lavra

As jazidas de rochas ornamentais podem ser lavradas em maciços rochosos e em matacões, utilizando-se métodos e técnicas que possibilitam resultados satisfatórios em termos da relação custo/benefício (REIS e SOUZA, 2003).

A lavra de rochas ornamentais é geralmente realizada a céu aberto, mas existe também a lavra subterrânea dessas rochas.

CHIODI FILHO (1995), resume os métodos de lavra de rochas ornamentais conforme a Figura 3.7:

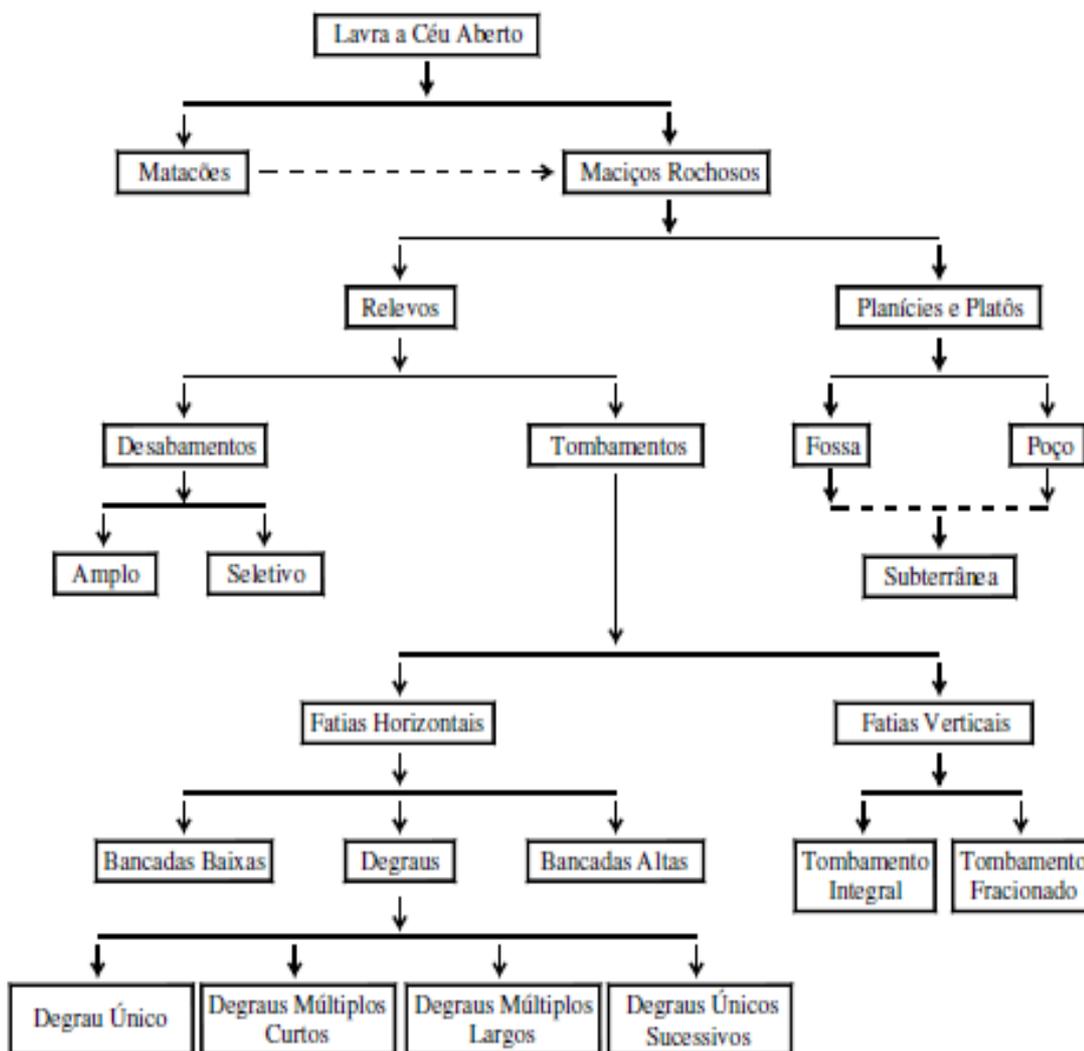


Figura 3.7: Tipos de lavras de rochas ornamentais. (CHIODI FILHO, 1995)

3.5.1 - Lavra de matacões

Matacões constituem porções específicas de um maciço rochoso, individualizados a partir da atuação de agentes intempéricos nas fraturas e destacados por erosão (CHIODI FILHO, 1995). Devido à esfoliação esferoidal concêntrica (acebolamento), o matacão

tem forma arredondada. Somente rochas silicatadas, comercialmente denominadas como granitos, formam matacões.

A lavra de matacões é um método de menor custo porque apresenta custos baixos para abertura de acessos, a mão de obra é pouco qualificada e os custos operacionais são reduzidos. Mas causa graves impactos ambientais. Não apresenta as garantias necessárias aos projetos de médio e grande porte, devido às dúvidas relativas à homogeneidade qualitativa da rocha e ao volume total da jazida, pois os matacões se dispõem no terreno de forma irregular, desvinculados das partes originais do maciço, soterrados no regolito, fato que dificulta a cubagem das reservas e previsão de produção.

Segundo da MATTA (2003), as dimensões dos matacões, viáveis economicamente, devem ser as máximas possíveis, da ordem de dezenas de metros cúbicos, mas se o material for de alto valor comercial, a lavra de matacões de 6 ou 7 m³ também é viável.

O processo de lavra é feito através de furos raiados coplanares e paralelos, efetuados por marteletes pneumáticos, a gasolina ou elétricos. Após os furos serem feitos, utiliza-se cunhas manuais ou cunhas pneumáticas para seccionar o corpo em pranchas, aproveitando-se as direções de clivagem naturais da rochas. Essas pranchas passam pelo mesmo processo, visando o desdobramento em blocos cada vez menores, até se atingir a dimensão comercial desejada.

No caso do uso de cunhas manuais, o processo é recomendado para matacões de até 100m³ e o processo é mais lento, por ser manual. Para um corte de uma superfície de 4 a 5 m de extensão, são necessárias 5 a 6 cunhas em furos coplanares e paralelos.

No segundo caso, utiliza-se explosivos em furos coplanares e paralelos.

O uso de cunhas manuais tem como vantagem investimento inicial baixo. E as principais desvantagens estão relacionadas ao grande volume de estéril produzido, gerando uma recuperação baixa e dificuldades de um planejamento mais abrangente.

Segundo da MATTA (2003), a partição dos matacões também pode ser efetuada com explosivos deflagrantes (pólvora negra). Faz-se o furo, preenche-o com pólvora negra e

coloca-se o tampão. Os matacões também podem ser partidos com argamassas expansivas (Figura 3.8).



Figura 3.8: Lavra de matacões – Guandu/Ba (da MATTA, 2003)

3.5.2 - Lavra de maciços rochosos

Os maciços rochosos são resultado de processos magmáticos, sedimentares ou metamórficos. São grandes massas de rocha derivadas da consolidação dos magmas que resfriaram no tempo geológico e foram expostos à superfície, principalmente devido à erosão. No caso de processos sedimentares, as rochas resultam de grandes depósitos de sedimentos que passaram por processos diagenéticos (compactação, dissolução, cimentação, recristalização diagenética). E as rochas metamórficas são formadas a partir da transformação de rochas magmáticas e sedimentares submetidas à elevadas temperaturas e pressões.

A lavra de maciços rochosos oferece maior aplicabilidade de técnicas em relação à lavra de matacões. Nesse tipo de depósito é possível ter um controle qualitativo e quantitativo da produção, fato que permite um planejamento de lavra mais acessível.

Segundo CHIODI FILHO (1995), Os principais componentes envolvidos na lavra de maciços rochosos são degraus, praça principal, praças secundárias, pistas, rampas e

frentes. O esquadreamento final dos blocos é realizado na praça principal, onde também são feitas as operações necessárias para seu transporte, localiza-se normalmente na base da pedreira. As praças secundárias são destinadas às operações funcionais de apoio ao desmonte. As pistas e rampas são as vias de ligação entre as praças, veículos de rodas pneumáticas trafegam nas pistas e veículos de esteiras nas rampas. A frente geral é o limite amplo da lavra e a frente de exploração atacada num determinado momento.

3.5.2.1 - Lavra tipo fossa e poço

Esses métodos são recomendados para jazidas que se encontram em planícies ou relevos bastante suaves, pois, após a lavra, forma-se uma depressão no terreno. São variações do método de lavra em bancadas.

A lavra em poço (Figura 3.10) é uma evolução da lavra em fossa (Figura 3.9), é utilizado em rochas de menor dureza. As rampas laterais da mina se tornam muito íngremes, muitas vezes verticais, causando risco de acidentes.

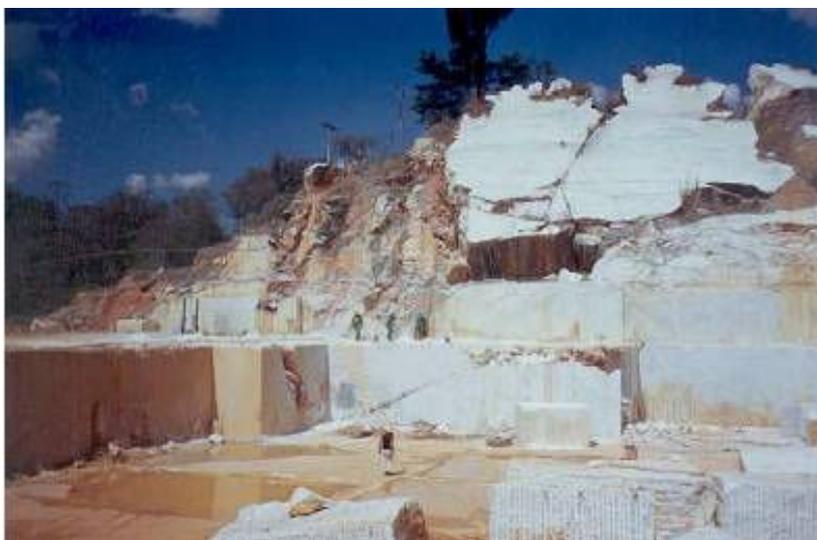


Figura 3.9: Lavra em fossa – Cachoeiro do Itapemirim/ES (da MATTA, 2003)

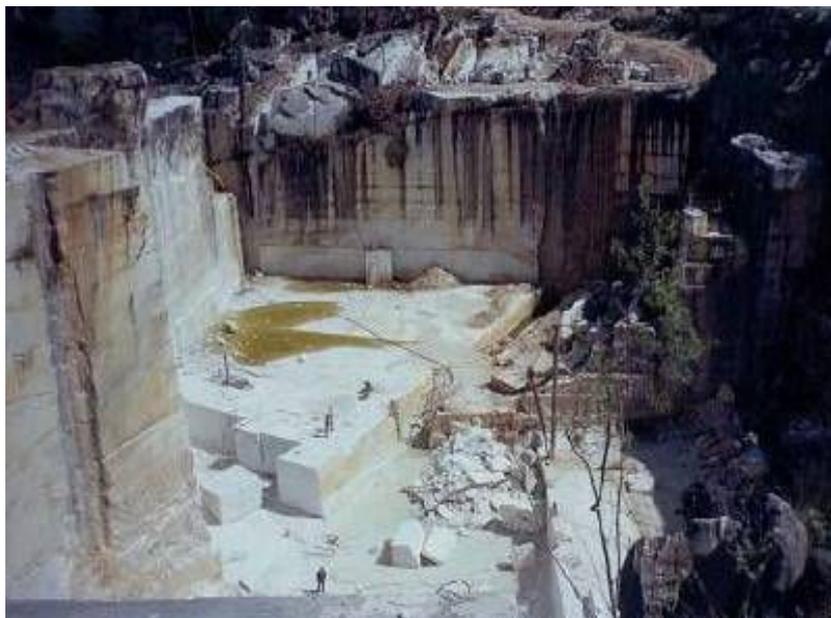


Figura 3.10: Lavra de mármore em poço – Cachoeiro do Itapemirim/ES (da MATTA, 2003)

O material é acessado através de rampas inclinadas. O impacto visual é pequeno pois a área explorada só pode ser vista de níveis mais elevados. O bombeamento de água na cava deve ser constante, pois o nível do lençol freático pode ser facilmente atingido.

O método de lavra em poço é mais oneroso que em fossa, pois para acessar a frente de lavra, devem ser feitas rampas laterais com forte inclinação. A pesquisa geológica é difícil e baseada somente em sondagens. Há fortes inundações e problemas de estabilidade de taludes maiores do que na lavra tipo fossa, o que causa sérios riscos de acidentes. Esse método deve ser evitado.

O avanço da lavra tipo fossa e poço pode conduzir à lavra subterrânea, devido ao elevado custo de produção.

3.5.2.2 - Lavra por desabamento

Esse método de lavra é aplicado em relevos acidentados e em maciços rochosos muito fraturados. Grandes pranchas verticais (painéis verticais, com altura maior que 12m), são desmontadas utilizando-se explosivos. Normalmente, são desmontados volumes na ordem de 3000 a 5000m³, de uma vez. Os maiores blocos são selecionados, com as formas mais apropriadas para esquadrejamento e produção de blocos comercializáveis.

O desabamento pode ser amplo ou seletivo (Figura 3.11). No caso do desabamento amplo, grandes cargas de explosivos são colocadas em pequenas galerias, gerando enorme volume de material fragmentado, bem como blocos irregulares.

Esse método está em desuso, pois a produção é descontínua o volume de estéril gerado é muito alto, tornando a recuperação baixa, em torno de 10 a 15%, o impacto ambiental gerado é alto. A utilização de explosivos de forma desordenada pode prejudicar os trabalhadores, a população e o meio ambiente devido às ondas de choque geradas, as quais promovem vibrações que podem atingir as moradias, dependendo da distância, os ruídos e gases nocivos gerados também podem ser prejudiciais.

Na lavra por desabamento seletivo, as restrições e os problemas operacionais são os mesmos do desabamento amplo. Desmontam-se porções específicas do maciço. Há necessidade de perfuratrizes, máquinas para arraste dos blocos e equipamentos para instalação das praças sobre os rejeitos.

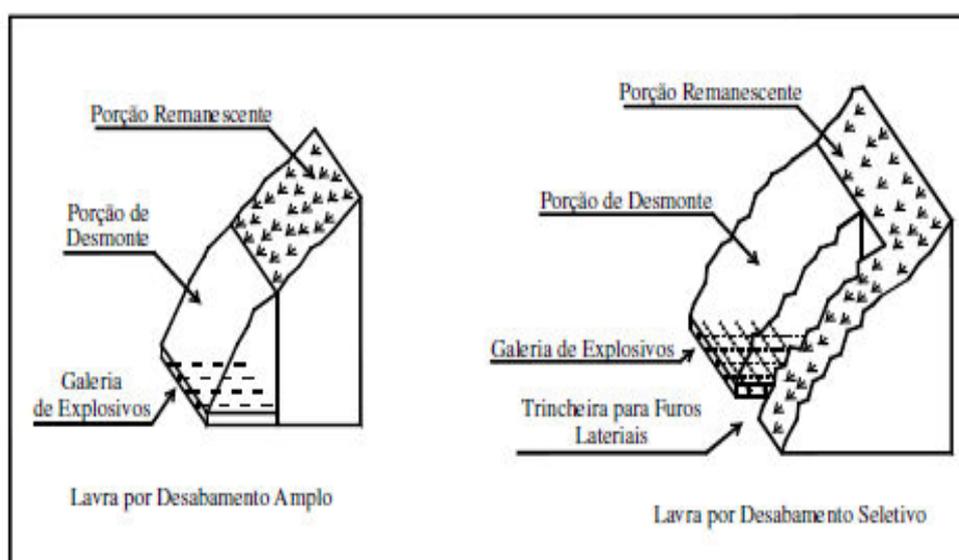


Figura 3.11: Lavra por desabamento – (RUSSO, 2011)

3.5.2.3 - Lavra por tombamento

Método utilizado para terrenos menos fraturados, realiza-se o tombamento em fatias verticais ou horizontais (Figura 3.12). Recomenda-se fatias horizontais quando o relevo

tem baixa a média inclinação (até 40°) e fatias verticais para relevo muito inclinado e superfície do terreno limitada.



Figura 3.12: Seções esquemáticas da lavra por tombamento, em fatias verticais (à esquerda) e em fatias horizontais (à direita) (CHIODI FILHO, 1995)

No método de fatias verticais, realiza-se o tombamento integral de uma fatia individual e o tombamento fracionado dos subníveis de cada fatia. Para painéis muito altos (entre 10 e 12 m), a furação vertical pode sofrer desvios, a movimentação de equipamentos no topo das fatias é limitada.

Segundo CHIODI FILHO (1995), o método de fatias horizontais, pode ser configurado através de bancadas altas, bancadas baixas e degraus, conforme a seguir:

- **Método de fatias horizontais - Lavra por bancadas altas**

Esse método é utilizado em maciços rochosos que apresentam heterogeneidade na qualidade e estrutura da jazida e quando possui altura de 6 a 16m. Consiste na abertura de bancadas, que constituem pranchas, com altura variando entre 4 e 16 metros. Essa altura corresponde a um número múltiplo do bloco comercializável. O bloco primário extraído, se desdobrará em blocos secundários e esquadrejados em blocos terciários ou finais.

O método é seletivo, fato que contribui para uma maior geração de rejeitos e menor recuperação. Mas o impacto ambiental pode ser minimizado através da recuperação da área concomitante ao avanço da lavra.

Pode-se utilizar diferentes tecnologias na lavra, incluindo-se o fio diamantado. O custo de produção é maior em relação ao método de bancadas baixas, pois requer maior quantidade de mão de obra e equipamentos.

A Figura 3.13, ilustra o corte de um bloco primário e a Figura 3.14 mostra o desdobramento do bloco primário em blocos secundários após o tombamento.



Figura 3.13: Lavra por bancadas altas. Corte de uma prancha primária – Nova Venécia/ES (da MATTA, 2003)

O bloco primário é desdobrado em blocos secundários:



Figura 3.14: Desdobramento de blocos - Nova Venécia/ES (da MATTA, 2003)

- **Método de fatias horizontais - Lavra por bancadas baixas**

Essa configuração é utilizada para uma jazida homogênea, a altura da bancada corresponde à dimensão do bloco comercializável, não sendo necessário o esquadrejamento do mesmo.

A recuperação é mais alta em relação ao método anterior, devido à extração ser pouco seletiva.

Esse método é mais seguro, possibilita um controle minucioso da frente de lavra. A Figura 3.15 ilustra esse método.

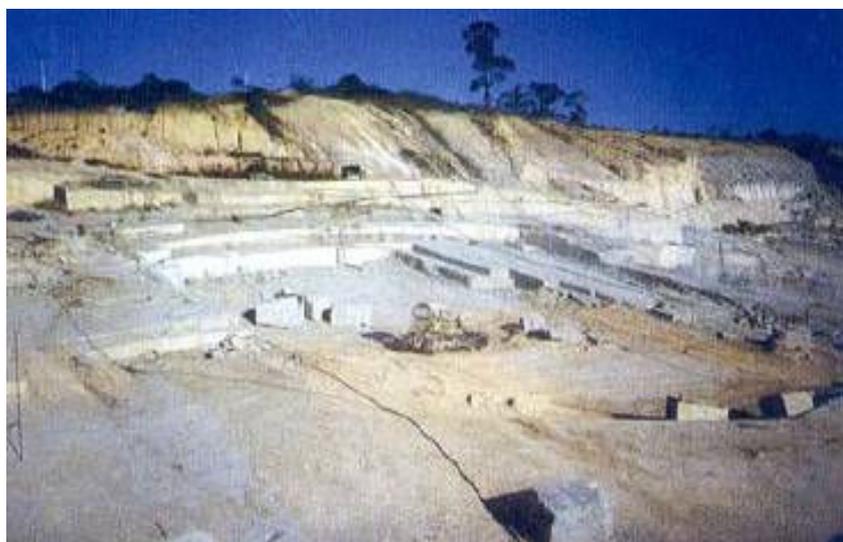


Figura 3.15: Bancadas baixas (da MATTA, 2003)

- **Método de fatias horizontais – Lavra por degraus**

Dependendo da configuração do relevo, os degraus podem ser, único, múltiplos curtos, múltiplos largos, únicos sucessivos (Figura 3.16):

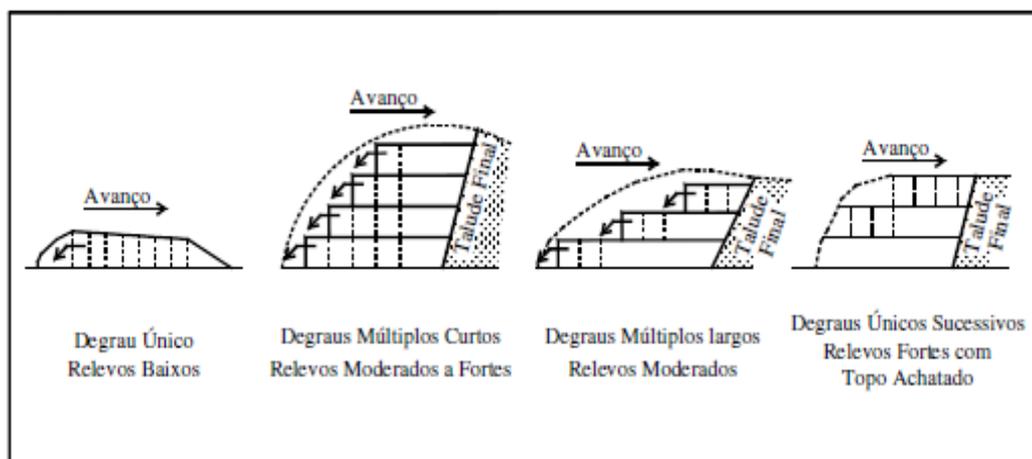


Figura 3.16: Método de fatias horizontais – Lavra por degraus (RUSSO, 2011)

- **Degrau único**

Esse método é aplicado em relevos baixos, o acesso é simples, a produtividade por m^2 é pequena. Nesse tipo de método, há flexibilidade de configuração e número de frentes de lavra e possibilidade de seleção de blocos.

- **Degraus múltiplos curtos**

Aplicado para rochas coerentes, com morfologia acidentada, a produtividade pode ser média a alta e há razoável flexibilidade com relação à configuração das frentes de trabalho.

- **Degraus múltiplos largos**

Pode ser aberta uma praça independente em cada bancada devido o relevo ser pouco íngreme. A produtividade por m^2 é baixa a média. Há flexibilidade quanto à configuração das frentes de trabalho.

- **Degraus únicos sucessivos**

Esse método é aplicado em relevos fortes, com o topo achatado. A lavra é descendente, a praça principal vai se deslocando para baixo de acordo com o avanço da lavra. A produtividade por m^2 é alta, há muita flexibilidade quanto à configuração das frentes de lavra.

3.5.2.4 - Lavra subterrânea

A lavra subterrânea é pouco utilizada para rochas ornamentais devido à existência de inúmeros depósitos aflorantes ou próximos à superfície. O uso desse método de lavra é justificado para jazidas de material com alto valor de mercado e quando existe grande quantidade de material estéril sobre a jazida (capeamento), pois o custo para sua remoção é grande (Figura 3.17).



Figura 3.17: Início de lavra de quartzito azul imperial, executada com fio diamantado Oliveira dos Brejinhos/BA (da MATTA, 2003)

3.6 - Técnicas de corte para desmonte

O estabelecimento da técnica ou conjunto de técnicas para desmonte de rochas ornamentais depende das características morfológicas, litológicas, estruturais e geográficas da jazida (CHIODI FILHO, 1995). Depende também da dimensão mínima dos blocos desejados e dos fatores econômicos.

As técnicas de corte, assim como os métodos de lavra influenciam na geração de rejeitos e na poluição ambiental.

As técnicas para desmonte podem ser divididas em corte cíclico e corte contínuo (da MATTA, 2003). As tecnologias de corte cíclico exigem a execução de furos na rocha

para o desmonte, às vezes utiliza-se explosivos deflagrantes. Já nas tecnologias de corte contínuo, não se realiza a furação nas rochas.

3.6.1 - Corte cíclico

Os cortes necessários para isolar um volume de rocha são realizados através da sucessão de diversas operações, algumas parcialmente ou totalmente sobrepostas, que vão constituir a fase de um ciclo (REGADAS, 2006).

da MATTA (2003), classifica as tecnologias de corte cíclico em:

- Perfuração e explosivo;
- Perfuração contínua;
- Divisão mecânica por cunhas;
- Divisão por agentes expansivos.

3.6.1.1 - Perfuração e explosivo

A rocha é perfurada com martetele pneumático em furos coplanares e paralelos, o espaçamento correspondente situa-se entre 8 a 20 vezes o diâmetro dos furos. Um plano de fogo adequado deve ser feito para isolar uma fatia de rocha possibilitando o esquadrejamento ou novas subdivisões. Os furos podem ser carregados com explosivos de baixa densidade como o tipo pólvora negra (Figura 3.18).



Figura 3.18: Colocação de explosivo para desmembramento da prancha.

(REGADAS, 2006)

3.6.1.2 - Perfuração contínua

Consiste na execução de vários furos próximos resultando em uma fenda na linha de furo. Os furos são realizados por corta blocos (slot drill), onde são acoplados um ou mais martelotes pneumáticos que executam a operação simultânea, deslocando-se sobre uma espécie de trilho. A operação é conduzida através de rotação contínua com percussões sobre a broca. O método é caro devido à grande quantidade de brocas utilizadas.

3.6.1.3 - Divisão mecânica por cunhas

A rocha é perfurada através de diversos furos separados linearmente em espaços curtos (Figura 3.19), posteriormente, é feita a divisão com cunhas, as quais são posicionadas entre linguetas de metal, a percussão é efetuada manualmente com a ajuda de marreta até criar fissura para partir a rocha. Esse processo é muito demorado, com baixa produtividade, de custo alto devido à grande quantidade de furos realizados, além de a chance desses furos sofrerem desvios, reduzindo a recuperação.



Figura 3.19: Execução da divisão mecânica por intermédio de cunhas. (REGADAS, 2006)

3.6.1.4 - Divisão por agentes expansivos

O princípio é o mesmo da divisão mecânica por cunhas, porém, aqui, as cunhas são substituídas por um tipo de massa auto expansiva que é aplicada nos furos (Figura 3.20). Realiza-se menos perfurações pois os espaçamentos são ampliados, resultando

em um menor custo de produção. A integridade física das rochas é preservada, aumentando a recuperação.



**Figura 3.20: Corte de matação efetuado com argamassa expansiva – Piranhas/GO.
(REGADAS, 2006)**

3.6.2 – Corte contínuo

Segundo (da MATTA, 2003), as tecnologias de corte contínuo são divididas em:

- Fio helicoidal e fio diamantado;
- Chama térmica (flame-jet);
- Cortador a corrente;
- Jato d'água (waterjet).

3.6.2.1 - Fio helicoidal e fio diamantado

A operação de desdobramento das pranchas com esses equipamentos não é interrompida até o ponto de alcance final desses equipamentos.

O fio helicoidal é composto por três fios de aço trançados em forma de helicóide, puxados por um motor. O fio é orientado por roldanas a uma velocidade de 10 a 15 m/s, sob uma tensão de 1500 a 2500N.

O fio helicoidal é utilizado para separar grandes pranchas de mármore, que são relativamente macias, para serem posteriormente subdivididas com o emprego de outras técnicas. Utiliza-se, na operação uma polpa de lama abrasiva composta por 70% de água e 30% de areia quartzosa, para maximizar o avanço e resfriar o fio.

Segundo CHIODI FILHO (1995), no início, utiliza-se de 6 a 8 litros de água por minuto e a velocidade de corte é de 1 a 2m² /hora.

O plano de corte é orientado com uso de poços, furos de grande diâmetro e trincheiras laterais, por onde é introduzido o fio para a inicialização do corte (DESCHAMPS *et. al.*, 2002).

O fio diamantado é composto por um fio de aço de 5mm de diâmetro, sobre o qual são fixadas pérolas diamantadas de 10mm de diâmetro (Figura 3.21), as quais são responsáveis pelo corte da rocha. Além das pérolas, o fio é composto por anilhas, molas, separadores e uniões. O fio diamantado também é tracionado por um motor e orientado por roldanas.



Figura 3.21: Exemplos de fios diamantados. (da MATTA, 2003)

A quantidade de pérolas varia dependendo da finalidade do fio: Para mármore: 30 a 32 pérolas por metro de fio; para granito: 40 pérolas por metro de fio.

A velocidade de corte é bem maior em relação ao fio helicoidal, para o corte de travertinos a velocidade é de 10 a 15m²/h, para mármore, 10 a 15m²/h e nos granitos, 2 a 5m²/h. Consome-se em torno de 500L/m² de água e a energia consumida é de 7,1Kw/m².

O fio diamantado tem como vantagem alta produtividade, melhor qualidade do corte, maiores recuperações na lavra e menores impactos ambientais e como desvantagem elevados custos operacionais devido ao alto desgaste do elemento diamantado (com ressalvas para os granitos).

O fio helicoidal tem sido substituído pelo fio diamantado, pois esse último apresenta maior velocidade de corte e maior capacidade de manobra de todo o equipamento e uma melhor compartimentação do volume de rochas a desmontar.

3.6.2.2 - Chama térmica (flame-jet)

Nessa técnica, utiliza-se uma chama com um bico por onde passa uma chama de até 2500°C. A chama é produzida por uma mistura de diesel e ar comprimido.

O corte é resultado da dilatação térmica diferenciada dos minerais constituintes da rocha, os quais se desintegram. Aplica-se em rochas silicatadas, preferencialmente nas mais homogêneas.

A espessura do corte é de até 10cm e a profundidade de corte é limitada (6 a 8m).

Esse método tem como desvantagem a geração de poluição sonora, rejeitos, calor, poeira e alterações na rocha. A velocidade de corte é baixa, em torno de 1m²/h. O custo é alto pois consome muito ar comprimido.

3.6.2.3 - Cortador a corrente

Os cortadores de correia e corrente possuem um braço que permitem cortar até 4m de profundidade (Figura 3.22), a espessura do corte é de 3 a 5cm. São utilizados no corte de rochas macias (carbonatadas) às rochas duras (silicatadas). Efetua-se o corte na rocha, estabelecendo-se uma sucessão de planos paralelos. Os planos podem ser verticais e também horizontais.



Figura 3.22: Cortador a corrente. (da MATTA, 2003)

Segundo da MATTA (2003), existem dois tipos de equipamentos:

- Aqueles que operam sobre trilhos em pedreiras a céu aberto;
- Aqueles que operam sobre colunas, muito utilizados na lavra subterrânea. Desloca-se verticalmente o equipamento sobre as colunas, para elevar o nível de corte.

É uma técnica limpa e produtiva, a velocidade de corte depende da dureza da rocha, para rochas macias, a velocidade pode chegar a $30\text{m}^2/\text{h}$ e em casos de rochas duras, de 5 a $6\text{m}^2/\text{h}$.

3.6.2.4 - Jato d'água (waterjet)

Trata-se de um processo em que se utiliza um jato d'água de alta pressão para o corte da rocha. Um aparelho chamado monitor forma o jato d'água e controla sua direção. A velocidade do jato é de 300 a 500m/s e a pressão de 150Mpa a 300Mpa.

O jato pode funcionar com água pura, ou misturada com abrasivos (areia ou outros), a distância do bico de jato à rocha pode variar entre 2 a 10cm.

O corte se dá devido ao arranque (escarificação) dos grãos, a erosão que a água provoca na rocha está relacionada às microdescontinuidades da mesma, a saber: Porosidade,

tamanho dos grãos dos minerais, composição mineralógica, grau de intemperização e comportamento elástico.

O consumo de água pode chegar no máximo a 60L/min. A principal vantagem desse método é a alta precisão, sobretudo para materiais altamente valorizados.

3.7 - Beneficiamento de rochas ornamentais

O beneficiamento de rochas ornamentais refere-se ao desdobramento de materiais brutos, extraídos nas pedreiras em forma de blocos ou, em alguns casos, como placas. Depois de extraída, a rocha passa por etapas de beneficiamento (corte, esquadrejamento e polimento) visando adequá-la às especificações de mercado.

3.7.1 - Beneficiamento de blocos

As rochas ornamentais extraídas em blocos, com dimensões normalmente de 5m³ a 8m³, podendo atingir até 12 m³, passam pelo processo de beneficiamento, que inclui a serragem do bloco em chapas e o acabamento final que inclui lustro, esquadrejamento, polimento.

Segundo RIBEIRO (2005), a serragem em teares é mais tradicional e mais produtiva. Os teares são melhor utilizáveis para os blocos maiores, na produção de chapas com 2cm e 3cm de espessura. Os talha-blocos (Figura 3.23) são indicados para blocos menores, antieconômicos nos teares na produção de chapas e tiras com 1 cm de espessura.



Figura 3.23: Talha-blocos para a produção de ladrilhos (RIBEIRO, 2005)

3.7.1.1 – Serragem em teares

Os teares são equipamentos utilizados para a serragem de blocos de rocha, transformando-os em placas. A serragem nos teares é executada através de um quadro com fixação de lâminas de aço paralelas, que desenvolvem movimentos retilíneos, pendulares ou curvo-retilíneo-curvo sobre a carga.

O tear de lâminas é composto por um quadro porta-lâminas que é sustentado por quatro colunas (Figura 3.24). Segundo COIMBRA FILHO (2006), as lâminas são dispostas no sentido longitudinal de maior comprimento do bloco e são tensionadas para manter um perfeito nivelamento, alinhamento e paralelismo entre si.



Figura 3.24: Tear multi-lâminas utilizado no corte de rochas ornamentais (COIMBRA FILHO, 2006)

Na serragem em teares, utiliza-se um fluido refrigerante (polpa de água, cal e granalha, que é despejada sobre a superfície de corte para aumentar a eficiência do corte e resfriar as lâminas. O material a serrar pode ser composto por um único bloco ou por blocos casados, chama-se rolha o bloco de pequena largura acoplado ao bloco maior e utilizado como complemento de carga. Não é ideal serrar de uma vez, blocos com alturas diferentes, materiais com diferentes durezas e chapas com diferentes espessuras, pois isso provoca desgaste diferencial das lâminas, vibração do equipamento, má planicidade das chapas e fragmentação do material.

A velocidade de avanço em teares com lâminas de aço situa-se entre 20 a 30 cm/h para mármores e 2cm/h para granitos. Em teares com lâminas diamantadas, a velocidade de avanço de corte pode chegar a 50 ou 60cm/h para mármores e 4 cm/h para granitos.

Os teares com corte a seco corta os blocos a seco, na posição vertical. Dispensa o uso da mistura abrasiva (lama) como elemento de transporte dos resíduos, utiliza somente granalha e lâminas. Os resíduos são eliminados pela ação da gravidade combinada com uma força de arrasto exercida pelo quadro porta-lâminas.

Teares mais modernos, inclusive nacionais, com grande capacidade de carga e alta velocidade de movimentação do quadro de lâminas, produzem até 5.000-6.000m²/mês em granitos e de até 8.000m²/mês em mármore.

A serragem de blocos em com fio diamantado (Figura 3.25) é uma recente tecnologia que encontra-se em estágio avançado e pode desenvolver-se ainda mais.



Figura 3.25: Tear multifios diamantados para o corte de granito (RIBEIRO, 2005)

3.7.1.2 – Serragem em talha – blocos

Os talha-blocos são equipamentos de serragem com discos diamantados, cortam grandes profundidades, sua maior utilização é voltada para produtos padronizados (ladrilhos). Os equipamentos com discos diamantados, capacitados para cortes mais rasos são chamados talha-chapas.

Nos talha-blocos a serragem é efetuada por discos diamantados, com diâmetros variados e capacidade convencional para cortes de até 1,20m (CHIODI FILHO, 1995).

CHIODI FILHO (1995), cita que existem basicamente três tipos de talha-blocos:

- Monodisco: Para cortes de grande diâmetro;
- Monoeixo/multidiscos: para discos de mesmo diâmetro ou dois diâmetros diferentes; e
- Multieixo/multidiscos: com discos de diâmetro crescente posicionados em linha.

O corte é realizado pelo atrito entre os segmentos sinterizados do disco e o bloco de rocha. O corte é resultante da combinação de dois movimentos: o de rotação dos discos e o de translação do mandril (onde os discos são fixados) em sucessivas passagens, com pequenos movimentos de descida do mandril.

Esse equipamento é de uso mais recente, menos difundido que os teares. São utilizados para fins mais específicos, com ladrilhos padronizados. O aumento do seu uso se deve ao desenvolvimento da aplicação de diamante nas técnicas de corte e com a redução dos custos dos segmentos diamantados.

A produtividade mensal em m² é superior à dos teares (50% a 100% maior), permitindo aproveitamento de materiais de primeira qualidade em blocos menores, que não seriam exportáveis, no caso do Brasil, pelo custo do frete marítimo e que seriam ainda não econômicos nos teares.

Outra vantagem dos talha-blocos é que os equipamentos admitem movimentação de eixo em ângulos variados (vertical até horizontal), permitindo, portanto, diferentes formas de desdobramento dos materiais. O custo médio de produção em talha-blocos é no entanto ligeiramente superior ao dos teares, tanto pelo preço dos equipamentos, quanto sobretudo pelo preço dos discos diamantados.

3.7.2 - Beneficiamento de chapas/placas

O material extraído na forma de blocos, é serrado em chapas, pelos teares ou talha-blocos para depois passarem pelas etapas de esquadrejamento, polimento e lustro. O material é extraído na forma de placas quando é possível aproveitar os planos de clivagem da rocha. O esquadrejamento e acabamento final é feito geralmente no local de extração (Figura 3.26).



Figura 3.26: Extração manual aproveitando-se os planos de fratura do quartzito, usando-se cunha e marreta (esquerda), desdobramento do quartzito (direita) (PIRES, 2007)

Após essa etapa, a rocha passa pelo processo de polimento. A Figura 3.27 ilustra o processo de polimento.



Figura 3.27: Polimento de quartzito extraído em Ouro Preto/MG. À esquerda, máquina de polimento manual e à direita, polimento automático (PIRES, 2007)

3.8 – Corte de rochas ornamentais utilizando disco diamantado

3.8.1 - Disco diamantado

O disco diamantado (Figura 3.28) é constituído por um disco de aço com segmentos soldados em sua periferia, os segmentos são formados por uma liga metálica (geralmente de bronze ou cobalto, estanho, tungstênio e níquel) e partículas de diamante, o diâmetro das partículas varia entre 150 a 1000 μ m. Dependendo da

espessura do material a ser cortado, o tamanho do disco diamantado pode variar entre 300mm a 4 metros de diâmetro (ROBLEDA *et. al.*, 2010).



Figura 3.28: Disco diamantado segmentado (ROBLEDA *et al.*, 2010)

Segundo LUO (1997) os discos diamantados cortam rápido, são econômicas e fáceis para operar, têm exatidão no corte de superfície.

Alguns dos principais fatores que afetam a qualidade do corte e a vida da lâmina são: diamantes e propriedades da matriz (tipo de diamante, concentração do diamante, tamanho do grão, dureza do metal de ligação, método de fabricação dos segmentos, condições de corte, velocidade periférica, velocidade de avanço, profundidade de corte, sentido de corte, propriedades físico-mecânicas e mineralógicas da rocha que será cortada, eficiência do fluido refrigerante (tipo de fluido e taxa de fluxo), condições da máquina de serragem e habilidade do operador.

Existem três tipos fundamentais de discos diamantados: Discos diamantados com borda contínua, de segmentos (para fornecer refrigeração e remoção de rejeitos) com ranhuras normais e os de segmentos com ranhuras reduzidas . A adequação de cada ferramenta para cada tipo de rocha depende desses componentes, assim como de outros fatores como diâmetro, morfologia dos segmentos, da coroa, tamanho do diamante, etc.

A operação de corte é efetuada por meio de velocidade constante ou variável sobre a superfície do material, provocando uma fricção que resulta no seu corte. A elevada temperatura atingida na lâmina e no material a cortar exige por vezes a utilização de fluidos como água ou ar frio.

Segundo SUÁREZ DEL RIO *et al.*, (1998), em primeiro lugar deve-se considerar o tipo de diamante, já que a natureza e forma dos diamantes pode variar, afetando também as características do corte. São utilizados diamantes sintéticos e naturais. Os sintéticos são mais utilizados, sua forma e tamanho podem ser escolhidos durante o processo de produção, já os naturais, que têm formas mais irregulares que os sintéticos, têm melhor retenção na matriz, arestas de corte mais agudas e maior estabilidade térmica.

Grãos menores de diamante devem ser utilizados para o corte de materiais mais duros, pois a carga por partícula é maior, grãos pequenos oferecem uma maior resistência à compressão e ao choque. Se grandes grãos de diamantes são usados em materiais duros, a penetração de diamantes é limitada, e normalmente uma grande quantidade de grãos sairão da matriz (pull out) ou grandes desgastes aparecerão nas partículas de diamante.

Uma maior concentração de diamante aumenta a vida útil do disco, porém, aumenta também o seu preço e o consumo de potência devido ao aumento da fricção entre o disco e a rocha.

Uma escolha incorreta da matriz e/ou tipo de diamante, tamanho e concentração, resulta em uma ferramenta que desgasta excessivamente ou não corta perfeitamente. (KONSTANTY, 2002).

3.8.1.1 - Processo de fabricação do disco diamantado

Geralmente, existem três tipos de lâminas de diamante, de acordo com seus métodos de fabricação: lâminas de diamante totalmente sinterizados, lâminas com os segmento de diamante soldados com pratas e lâminas com os segmento de diamante soldados a laser.

As lâminas com os segmentos de diamante sinterizados são fabricadas colocando o núcleo de aço do disco junto com os diamantes e os metais de ligação em um molde

sendo sinterizados em uma máquina de sinterização. Assim, o diâmetro dos discos de diamante inteiramente sinterizado não é muito grande e normalmente não é maior do que 400 milímetros. Também por causa da sua participação no processo de sinterização, o núcleo de aço não pode ser excluído, por isso a resistência do núcleo não é muito elevada, podendo esses tipos de disco deformar em cargas elevadas e nos processos de corte de alta intensidade.

Discos diamantados soldados a prata e a laser, no entanto, não têm esse problema. Porque seus segmentos de diamante e núcleo de aço são tratados separadamente. O núcleo de aço pode ser processado com tratamentos térmicos, por isso, sua resistência e dureza podem ser elevadas, podendo o disco ser usado em cargas elevadas e alta intensidade de corte sem deformação, alcançando alta eficiência de corte.

Discos diamantados com segmentos soldados a prata: segmentos contendo diamante são soldados ao núcleo de aço usando uma solda de prata. Discos diamantados com solda de prata só podem ser usados em cortes a água. Porque se usada a seco, a solda de prata pode derreter sob a alta temperatura gerada no corte e os segmentos podem desprender do núcleo de aço sendo extremamente perigoso. Como a solda a laser une muito bem o segmento diamantado ao núcleo de aço, esses discos podem ser utilizados em aplicações de corte a seco em velocidade de corte altas.

Os discos diamantados normalmente têm dentes retangulares (segmentos) que contém cristais de diamantes incorporados em todo o segmento. O metal de ligação é usado para formar a matriz dos segmentos. Ele se desgasta com o uso permitindo que os diamantes fiquem expostos na superfície.

Um passo importante na escolha do disco é combinar o metal de ligação certo para o material a ser cortado. Outros fatores a considerar são o tipo e a potência do equipamento a ser usado e a disponibilidade de água. Além da natureza do material a ser serrado, há também alguns aspectos importantes que devem ser considerados quando se está escolhendo um disco diamantado. Esses aspectos incluem o tipo de lâmina, a disponibilidade de água no processo de corte, a potência da máquina de corte, se precisa fazer menos ruído, etc.

A Figura 3.29 ilustra um esquema de uma parte de um disco construído com chapa de aço de 1,3mm de espessura com segmentos soldados de 3 x 10 x 13mm³.

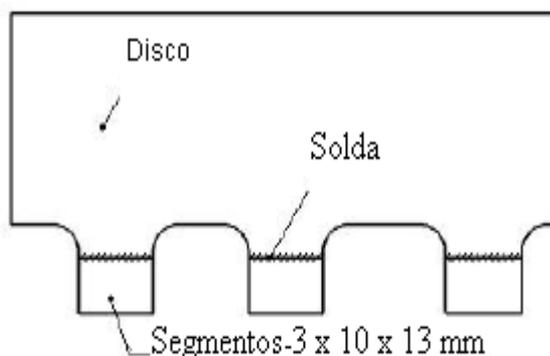


Figura 3.29: Parte de um disco diamantado segmentado (ROBLEDA *et al.*, 2010)

3.8.2 - Mecanismo de corte de rochas ornamentais com disco diamantado

O processo de corte se produz pela trituração e deformação inelástica da rocha logo abaixo do indentador, seguido da formação de uma “cratera” devido ao crescimento de fissuras laterais desde a ponta do indentador até a superfície (RODRÍGUEZ-REY *et al.*, 1998). SWAIN e LAWN (1976) descrevem o processo de corte de rocha durante um ensaio de microindentação em um material frágil (Figura 3.30). Quando se aplica a carga do indentador na rocha, esta se deforma inelasticamente produzindo uma zona de trituração e a nucleação de algumas fissuras (Figura 3.30 a); ao aumentar a carga compressiva, cresce uma ou várias fissuras médias (M) com forma circular na direção do plano de aplicação da carga (Figura 3.30 b). Simultaneamente se formam umas fissuras dispostas em forma de cone invertido (são denominadas fissuras em cone, C) que termina na zona de trituração (Figura 3.30 c). Durante a descarga pode diminuir a largura das fissuras criadas (elas se fecham ligeiramente (Figura 3.30 d) e começam a crescer umas fissuras laterais (L) a partir da zona de trituração (Figura 3.30 e) que chegam até a superfície (Figura 3.30 f).

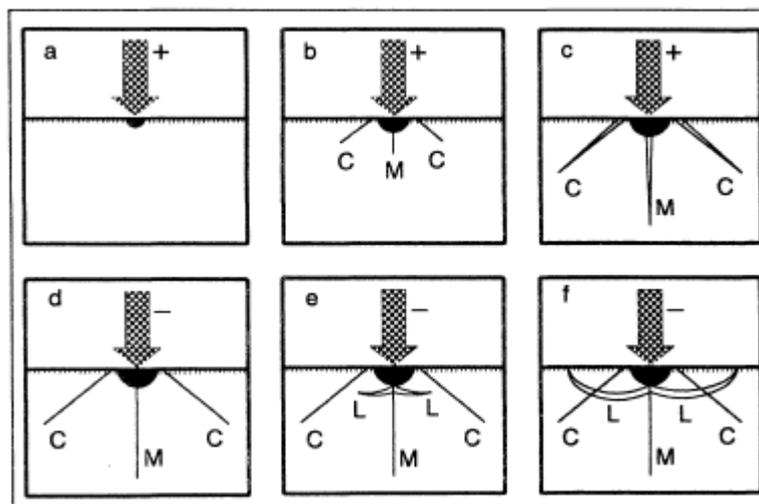


Figura 3.30: Processo de fissuração durante um ensaio de microindentação em um material frágil. (SWAIN e LAWN, 1976)

3.8.2.1 – Direção de corte

Segundo BUYUKSAGIS (2007) a literatura fala pouco sobre o efeito das direções de corte “up-cutting e down-cutting” na serrabilidade de granitos e há uma necessidade de mais pesquisa nesse campo. Tal necessidade decorre do fato desses estudos mostrarem que o comportamento na serrabilidade de granito estar principalmente concentrado ou em uma direção de corte ou em um tipo de rocha.

Segundo SUÁREZ DEL RIO *et al.* (1998), a direção de corte é um fator que afeta a distribuição das forças no disco (e, portanto seu rendimento), assim como o tipo de desgaste que sofre.

A cinemática relacionada aos modos de corte “up-cutting e down-cutting” é mostrada na Figura 3.31.

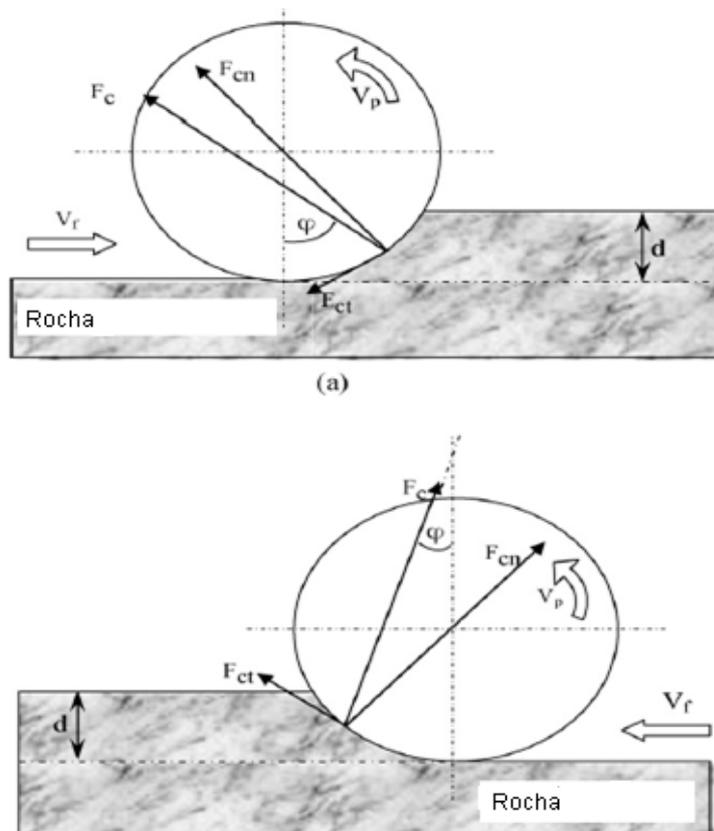


Figura 3.31: A cinemática do processo para: (a) modo “up-cutting” e (b) modo “down-cutting”. (BUYUKSAGIS, 2007).

Onde:

F_{ct} = força tangencial;

F_{cn} = força normal;

F_c = força resultante de corte;

d = profundidade de corte;

V_f = velocidade de corte;

V_p = velocidade periférica;

φ = ângulo da força resultante;

A direção é denominada “up- cutting” quando o deslocamento do material a cortar coincide com o giro do disco e “down-cutting” quando o sentido do giro do disco é contrário ao deslocamento do material. Segundo SUÁREZ DEL RÍO *et al.* (1998), no modo “up-cutting” se geram maiores forças verticais (compressivas) e menores forças horizontais (de cisalhamento) do que no modo “down-cutting” (Figura 3.32).

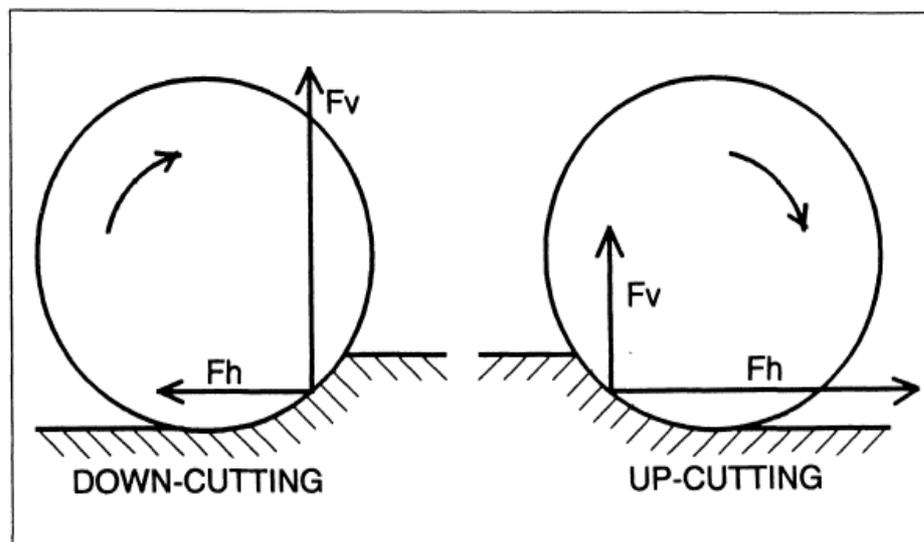


Figura 3.32: Representação gráfica das forças horizontais. (F_h) e verticais (F_v) durante o corte para baixo (“down-cutting”) e para cima (“up-cutting”) (SUÁREZ DEL RIO *et al.*, 1998)

Contrariamente ao modo up-cutting, o processo “down-cutting” começa gerando muitos fragmentos, causando alto impacto nos grãos de diamante. Conseqüentemente, esse alto impacto leva a fraturas ou arrancamento dos grãos de diamante, causando o desgaste da lâmina de serra mais rapidamente quando comparado ao modo “up-cutting”.

3.8.2.2 - Parâmetros de operação de corte

É necessário trabalhar com valores ideais dos parâmetros de operação de corte, para que a vida útil do disco seja prolongada e a velocidade de corte seja a ideal para a produção desejada.

Segundo ERSOY e ATICI (2004), as forças envolvidas no corte são ilustradas na Figura 3.33:

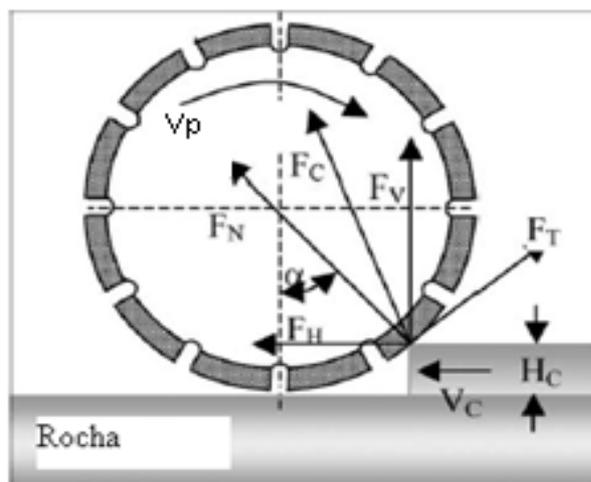


Figura 3.33: Cinemática do corte (ERSOY *et al.*, 2005)

Onde:

V_p = velocidade periférica;

V_c = velocidade de corte;

H_c = profundidade de corte;

F_v = força vertical;

F_H = força horizontal;

F_N = força normal;

F_T = força tangencial;

F_C = força de corte;

α = ângulo de efeito da força normal.

Os parâmetros de operação são rotacional (velocidade periférica), velocidade de corte ou taxa de alimentação, profundidade de corte, taxa de remoção específica, forças horizontal, vertical e axial, potência e energia específica requerida.

- **Força de corte**

As forças horizontal e vertical podem ser medidas durante os testes. As forças normal, tangencial e força de corte podem ser calculadas através das equações 3.1, 3.2 e 3.3, respectivamente. (ERSOY e ATICI, 2004):

$$F_N = F_V \cos \alpha + F_H \sin \alpha \quad (3.1)$$

$$F_T = F_V \sin \alpha + F_H \cos \alpha \quad (3.2)$$

$$F_C = (F_N^2 + F_T^2)^{1/2} \quad (3.3)$$

Onde:

F_H = força horizontal (N);

F_V = força vertical (N);

F_N = força normal (N);

F_T = força tangencial (N);

F_C = força de corte (N);

α = ângulo de efeito da força normal.

- **Velocidade de corte**

É definida como a distância de corte por unidade de tempo (m/min). A velocidade periférica, e as forças que atuam no disco determinam a velocidade de corte. A velocidade de corte deve ser ideal para a melhor performance da lâmina. Uma velocidade de corte alta pode causar desgaste prematuro do disco por arrancar as partículas de diamante e não penetrar na rocha suficientemente.

Se a velocidade de corte é considerada a base para a otimização, então a velocidade de corte máxima pode ser obtida quando cada parâmetro da operação é aplicado em seu nível ótimo.

- **Velocidade periférica**

Deve ser determinado um valor ótimo de velocidade periférica para cada rocha. Quando a velocidade periférica é aumentada, as forças (especialmente normal e tangencial) diminuem. Quanto maior a velocidade periférica, menor a quantidade de material cortado. Se a velocidade é muito alta, os diamantes trabalharão pelas suas pontas e podem desgastar. Se é muito baixa, o ligante é rapidamente erodido e o desgaste é maior (NEVES, 1997).

- **Profundidade de corte**

A profundidade de corte pode ser definida como a quantidade da penetração do disco na rocha. Esse parâmetro depende das especificações do produto final.

- **Taxa de remoção específica**

Taxa de remoção específica ou taxa de corte é a quantidade de material serrado por unidade de tempo ou a área cortada por unidade de tempo, é expressa geralmente em cm^2/min ou m^2/h .

Na prática, taxa de remoção específica pode ser calculada pela equação 3.4:

$$Q'_w = L \times H / t \quad (3.4)$$

Onde:

Q'_w = taxa de remoção específica (cm^2/min);

L = comprimento do bloco/placa (cm);

H = altura do bloco;

t = tempo de corte (min).

- **Energia específica de corte**

A energia específica de corte (EC) é a quantidade de energia necessária para cortar um dado volume de rochas. A quantidade de energia específica consumida é útil para estimar a potência requerida para uma operação de corte particular. A avaliação da performance da serra em uma operação de corte é dada pelo estudo de sua EC. Um baixo valor de EC indica que a serra está cortando de maneira mais eficiente e os custos são menores.. A energia específica de corte, pode ser calculada pela equação 3.5, proposta por ERSOY e ATICI (2004) em um estudo de corte com 16 tipos de rochas ornamentais, realizado na Turquia.

$$EC = P_c/Q_w = F_T V_p / H_c W_M V_f \quad (3.5)$$

Onde:

EC = energia específica de corte (J/m³);

P_c = potência requerida do motor para o corte de rocha (kW, HP);

Q_w = volume de corte (m/s);

F_T = força tangencial (N);

V_p = velocidade periférica (m/s);

H_c = profundidade de corte (m);

W_M = comprimento do segmento (m);

V_f = velocidade de corte (m/s).

Um valor baixo de EC indica que a rocha é cortada com mais eficiência. Velocidade de corte alta é relacionada com baixa EC. A EC é uma medida importante para avaliar a

eficiência do corte, porque é o montante de energia necessária para o corte da rocha. Assim, a EC é muito dependente do tipo de disco diamantado.

Estudos mostram que a energia específica diminui com o aumento da profundidade de corte.

3.8.3 – Uso de água no corte

Discos diamantados trabalham melhor quando cortam à água. A água evita que a lâmina aqueça muito, reduz significativamente a quantidade de poeira criada no corte, e remove os rejeitos do corte. Diamantes não suportam as forças envolvidas em elevadas temperaturas de corte a seco de materiais abrasivos, pois estão sujeitos a desgaste rápido e a possíveis falhas. A vida do disco é prolongada com o corte a úmido. Contudo, muitas lâminas são projetadas para operar molhadas ou secas.

Quando a água não pode ser usada (serras elétricas, por exemplo), devem ser tomadas medidas para que o operador não inale o pó criado pelo processo, o que representa um risco muito grave à saúde. Quando se faz corte a seco, a lâmina deve ser resfriada periodicamente.

3.8.4 - Influência das características da ferramenta de corte

Segundo SUÁREZ DEL RIO *et al.*, 1998, é importante considerar a versatilidade da ferramenta de corte com respeito a possibilidade de variação de potência e velocidade periférica, pois a potência requerida para o corte de algumas rochas duras pode ser muito elevada, porém, a mesma pode ser reduzida se puder aumentar a velocidade periférica do disco.

Se a ferramenta de corte não oferece essa possibilidade, pode-se variar a velocidade periférica, variando-se o diâmetro do disco, para isso é necessário trocá-lo, fato que pode aumentar os custos.

3.8.5 - Desgaste de discos diamantados

O desgaste pode ser definido como a remoção de material sólido da superfície como resultado de movimento de deslizamento na superfície de contato. O desgaste pode ser controlado pelo tipo e propriedades dos materiais que interagem, as condições de trabalho e o tipo de interação no deslizamento.

O desgaste da serra no corte de rochas é o principal fator que controla a vida da mesma e os custos de corte e, pode determinar o método de corte para cada tipo de rocha. O desgaste diminui a taxa de corte e aumenta o consumo de energia, pode também causar fraturas nos diamantes. Diferentes tipos de rocha produzem diferentes taxas de desgaste de acordo com a natureza de interação entre a rocha e a serra.

É necessário que a matriz que contem os diamantes, tenha dureza alta para que os diamantes não se desgaste rapidamente. Se a matriz for muito dura, os diamantes serão muito solicitados e podem se desgastar cedo, se a matriz for muito branda, os diamantes podem se desprender facilmente.

O resultado final do desgaste da lâmina e, da energia gasta, retrata a interação entre as propriedades intrínsecas da rocha, minerais abrasivos e das variáveis operacionais do processo. Para compreender adequadamente as interações entre essas variáveis, é conveniente organizá-las de tal maneira que cada aspecto particular seja tratado como elemento de um conjunto com determinado número de variáveis. Dessa forma, têm-se envolvidos os seguintes parâmetros: da rocha – mineralogia, textura, grau de alteração, anisotropia e propriedades mecânicas; do processo – velocidade periférica, força aplicada e tipo de movimento.

3.8.5.1 - Mecanismo de desgaste de discos diamantados

De acordo com LUO e LIAO (1995), no corte com disco diamantado, o desgaste pode ser definido como qualquer degradação, macroscópica ou microscópica que reduz a vida da lâmina.

O desgaste pode ser caracterizado a partir da aparência das partes desgastadas ou do mecanismo e das condições que prevalecem durante a remoção de material. Classificação como desgaste leve, desgaste grave, deformação, são baseadas na observação das partes desgastadas. Contudo, há outras formas de desgaste como abrasivo, adesivo, erosivo, corrosivo etc. que são baseados no mecanismo de remoção de material ou nas condições que existem durante o processo de desgaste (ERSOY *et al.*, 2005). A Figura 3.34 mostra como os diamantes são desgastados à medida que são utilizados no corte das rochas, com o disco girando em um só sentido.

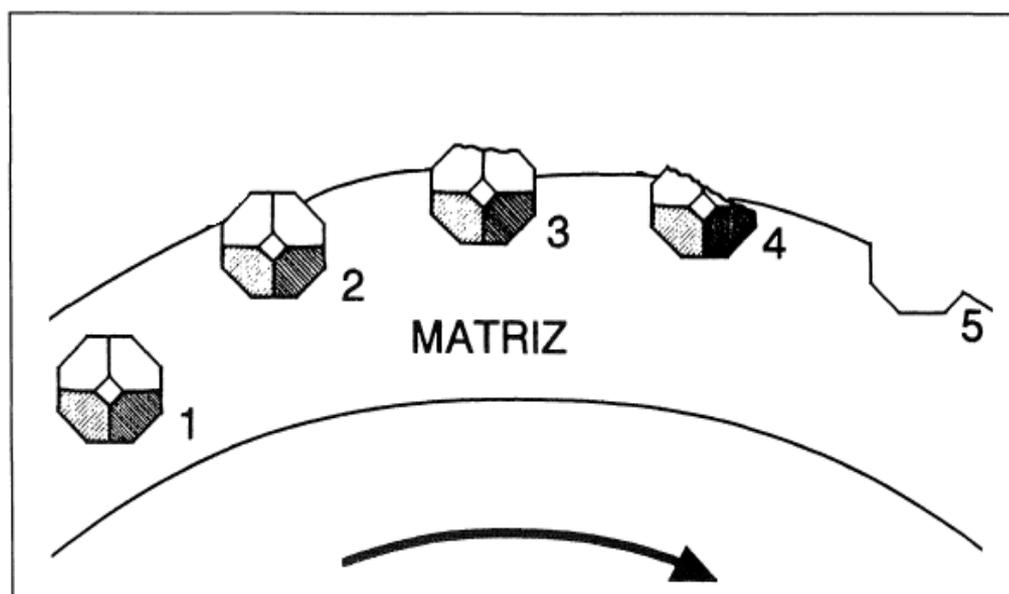


Figura 3.34: Fases pelas quais os cristais de diamante passam durante o corte: 1) incluídos na matriz; 2) início da atividade; 3) começo do desgaste; 4) fraturação e 5) arranque (SUÁREZ DEL RIO *et al.*, 1998).

Desgaste abrasivo é o principal responsável pelo desgaste da serra. Cerca de 80% da crosta terrestre é composta por minerais abrasivos duros como a sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e hematita (Fe_2O_3). Não é surpreendente admitir que o principal mecanismo pelo qual as serras são desgastadas é abrasão (ERSOY e ATICI, 2004).

Porém, desgaste por erosão, fadiga e corrosão podem também contribuir para o desgaste das serras de diamante. Erosão do segmento da serra ocorre quando o fluido de corte é extremamente elevado. Desgaste abrasivo ocorre por um mecanismo microscópico

envolvendo as camadas da superfície, contudo, eventualmente pode ser observado em escala macroscópica. A fadiga da serra pode provavelmente ser a mais catastrófica forma de desgaste, pode ocorrer quando há cargas altas sobre a serra, a borda da serra pode ser quebrada pelos repetidos impactos sobre a superfície.

O material da matriz deve desgastar à mesma taxa que as partículas de diamante, a fim de possibilitar um corte constante e eficiente, se o material da matriz é macio, os diamantes serão muito solicitados e serão perdidos antes de completar sua vida de corte.

Se o diamante for arrancado da matriz prematuramente antes de completar sua efetiva vida de trabalho, haverá um buraco profundo na superfície de trabalho desgastada. Reciprocamente, o grão de diamante pode dar uma boa vida de corte antes da partícula ser puxada para fora da matriz, em tais condições, a superfície desgastada contém um buraco menos profundo.

O desgaste é função do conteúdo de minerais abrasivos (quartzo), diâmetro médio dos grãos, resistência à tração. A velocidade de corte também influi. Para cada rocha há uma velocidade crítica que ao ser ultrapassada aumenta o desgaste, pois a temperatura aumenta. A velocidade crítica depende da profundidade de indentação, forma do elemento cortante, tipo de rocha.

3.9 - Propriedades das rochas e o processo de desdobramento

A performance da serra é afetada por inúmeros fatores, os quais podem ser sumarizados na Tabela III.3. Contudo, o principal fator que requer maior consideração, são as características da rocha, o design da serra e os parâmetros de operação da serra.

Tabela III.3: Fatores que afetam a performance da serra circular diamantada (ERSOY e ATICI, 2004)

Características da rocha				Características operacionais da serra	Design da serra	Desgaste	Máquina	Outros
Textural	Mecânico	Estrutural	Intemperismo					
Tamanho do grão	Força	Juntas	Alteração	Força na serra	Mecanismo de corte	Abrasivo	Potência	Habilidade do operador
Forma do grão	Dureza	Fraturas			Modo de corte		Vibração	Ambiente
Tipo de mineral e conteúdo	Abrasividade	Clivagens	Conteúdo de água	Velocidade de corte	Propriedades dos diamantes	Erosivo		Clima
Tipo de mineral e conteúdo	Pressão dos poros	Foliação		Taxa de remoção específica	Propriedades da matriz			
Tipo da matriz e conteúdo		Falhas e dobras			Exposição dos segmentos	Choque térmico		
Grau e tipo de cimentação		Cimentação		Velocidade periférica	Densidade dos segmentos			
Estrutura do ligante "bonding"		Orientação		Profundidade de corte	Perfil da serra	Fadiga térmica		
				Energia específica	Hidráulica da serra			
					Fabricação	Carga de impacto		

Vários pesquisadores têm estudado a performance da serra diamantada no processo de corte de rocha. Na maioria dos estudos, um único tipo de rocha é usado. Os testes realizados quase sempre não incluem todas as propriedades das rochas que influenciam no corte. As características dos grãos das rochas (como tamanho, forma e orientação dos grãos, a disposição e ligação entre os grãos, etc), o conteúdo de sílica e a estrutura física também são importantes.

O corte varia de acordo com cada tipo de rocha e para diferentes amostras da mesma rocha.

A caracterização tecnológica dessas rochas pode ser feita por meio de testes que determinam as propriedades físicas e mecânicas e objetivam balizar os campos de aplicação dos materiais conforme padrões normatizados. No entanto, as propriedades mais importantes para a construção civil, não são necessariamente as mais importantes para o estudo do processo de corte das rochas ornamentais. SPÍNOLA (1998) utilizou

alguns ensaios com o objetivo de verificar a influência da qualidade da serragem de granitos no consumo energético do desbaste, são eles: análise petrográfica, índices físicos e resistência à compressão uniaxial.

O avanço tecnológico dos equipamentos utilizados no corte de rochas ornamentais tem proporcionado significativo aumento na produção e na qualidade dessas rochas. As rochas são materiais com diversidade em suas características e que necessitam de um controle tecnológico que considere, entre outras variáveis, as relações dos minerais presentes, a textura e a estrutura da rocha.

Alguns autores têm relacionado as características tecnológicas com as propriedades petrográficas das rochas (RIBEIRO, 2005).

STELLIN e VIDAL (2001), ao estudar o elemento abrasivo do fio diamantado na lavra de alguns granitos do estado do Ceará, verificou que a velocidade de corte e o consumo dos anéis de pérolas diamantadas são influenciados pela quantidade de quartzo presente na rocha. Esses valores estão relacionados com a serrabilidade das rochas.

TORQUATO *et al.* (2002) utilizaram os valores de velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas para determinar, indiretamente o grau de alteração e coesão das rochas. Acreditava-se que os granitos eram isotrópicos, porém, houve grande variação nos valores de velocidade da onda ultra-sônica, fato que indica a anisotropia da rocha, que foi determinada a partir dos valores de velocidade máximos e mínimos.

As rochas são formadas por diferentes minerais, cada um com características particulares, que respondem diferentemente ao conjunto das solicitações impostas na serragem. As proporções relativas entre eles e as variações texturais, como, por exemplo, tamanho, forma, imbricamento dos cristais, grau de alteração, etc., podem ser responsáveis por diferenças na resistência à abrasão e ao impacto das lâminas.

A serrabilidade refere-se à facilidade com que uma rocha é serrada. Uma rocha é de difícil corte quando são elevados o tempo decorrido para essa operação e o consumo de energia. O tipo de material constitui um dos principais parâmetros que influenciam o corte. Muitas características intrínsecas da rocha têm relação direta com a sua

serrabilidade, como o coeficiente de dilatação linear, tamanho dos cristais, a matriz da rocha, densidade e porosidade.

Outras propriedades das rochas que influem no trabalho de corte e serragem são:

- Abrasividade;
- dureza;
- absorção de água;
- porosidade;
- resistência a compressão simples;
- resistência à tração;
- heterogeneidade.

O conhecimento das propriedades das rochas é essencial para a serragem, para a máquina de corte e para a seleção das condições de operação. Tanto para o processo de corte como para o produto final, é muito importante conhecerem-se as propriedades físicas, químicas, petrográficas e mecânicas das rochas ornamentais. Para isso torna-se necessária a realização de ensaios em laboratórios.

A seleção das rochas ornamentais deve levar em conta feições estéticas e tecnológicas. As características tecnológicas refletem basicamente o comportamento físico-mecânico das rochas no processo de beneficiamento e nas condições normais de utilização.

Os ensaios de caracterização tecnológica objetivam balizar os campos de aplicação dos materiais e o seu comportamento frente às solicitações. Os procedimentos e padrões de avaliação dos resultados de ensaios tecnológicos são determinados por normas técnicas.

Segundo NEVES (1997), muitas propriedades se manifestam simultaneamente nas rochas, sendo impossível basear em valores isolados para definir as restrições que as rochas oferecem à serragem.

O desgaste é função do conteúdo de minerais abrasivos, diâmetro médio dos grãos e resistência à tração. A velocidade de corte também influi no desgaste, para cada rocha há uma velocidade de corte crítica que, ao ser ultrapassada aumenta o desgaste, pois a temperatura aumenta.

A interação entre a composição, texturas e estruturas é o fator que define a resistência aos agentes químicos, físicos e mecânicos de toda rocha, ou seja, é o resultado das suas características (SELONEN *et al.*, 2000).

SELONEN *et al.* (2000), constatou que a interação entre a composição, texturas e estrutura da rocha é o fator que define a resistência aos agentes químicos, físicos e mecânicos de toda rocha.

Assim, a petrografia microscópica é um método no qual se identifica os constituintes da rocha, como composição mineralógica, textura, grau e tipo de alteração, estado microfissural. Essas características permitem prever e explicar o comportamento das rochas nos ensaios tecnológicos e nas etapas de serragem.

3.9.1 - Influência das características petrográficas e físicas

Diferentes rochas responderão diferentemente ao processo de corte devido também às suas características petrográficas (mineralogia, textura e espaços vazios). Mesmo em rochas monominerais, o comportamento será diferente, devido ao tamanho dos cristais, forma e disposição (textura).

- **A mineralogia**

Segundo RODRÍGUEZ-REY *et al.* (1998), a proporção de quartzo é um dos fatores petrográficos que influenciam na cortabilidade das rochas, mas não pode ser considerado como o único indicador de cortabilidade. Diferentes materiais responderão diferentemente a um corte nas mesmas condições (mesma força, mesmo disco, mesmo tipo de diamante e líquido refrigerante), isso também se deve à sua composição mineralógica. Uma rocha com maior proporção de quartzo, por exemplo, poderá causar maior desgaste ao disco e ter maior resistência ao corte. A dureza de Mohs (resistência

que o material oferece para ser cortado) também é um outro fator importante relacionado à mineralogia, uma rocha com menor dureza como a calcita (dureza 3), poderá ser mais fácil de cortar do que o quartzo, cuja dureza é 7. Facilidade de cortar nesse trabalho refere-se ao menor gasto de tempo e consumo de energia.

- **A textura**

Segundo RODRÍGUEZ-REY *et al.* (1998), a textura se refere à forma, tamanho e disposição dos minerais na rocha. Quanto maior o tamanho de um grão, maior pode ser a abrasividade da rocha. Outras características texturais da rocha, como a orientação dos grãos e a união entre os cristais têm uma influência sobre a cortabilidade da mesma.

- **Os espaços vazios**

Segundo RODRÍGUEZ-REY *et al.* (1998), tanto os poros como as fissuras contribuem para reduzir a união textural da rocha, modificando suas características elásticas, e portanto, modificando os campos de esforços criados durante o corte com disco. A zona de trituração e as fissuras médias, em cone e laterais, produzidas durante o corte, interferem com as fissuras ou espaços vazios da rocha facilitando o arranque das partículas da rocha e afetando, portanto, sua cortabilidade.

As tentativas de encontrar uma correlação entre a cortabilidade das rochas e suas características petrográficas não têm chegado a conclusões gerais, provavelmente devido à falta de especialistas em petrofísica (disciplina que interpreta as propriedades físicas das rochas em função de suas características petrográficas) capazes de quantificar estes parâmetros (RODRÍGUEZ-REY *et al.*, 1998).

- **Propriedades físicas e mecânicas**

Se a rocha for muito porosa, haverá, redução da resistência dinâmica à compressão, e conseqüentemente, aumento da fragmentação e da porcentagem de finos, fato que prejudica o corte. Nas rochas que absorvem mais água, haverá menor resistência à compressão e à tração por ser menor a fricção entre as partículas, intensificando a ruptura pelo corte.

TUGRUL e ZARIF (1999) estudaram algumas amostras de granito provenientes da Turquia para relacionar as propriedades petrográficas e mecânicas das mesmas. Nesse estudo, esses autores concluíram que:

- O tamanho médio dos grãos dos minerais influencia na resistência das rochas (a resistência aumenta à medida que o tamanho do grão diminui).
- A composição mineralógica é um dos principais fatores que influenciam na resistência das rochas. A composição de quartzo e feldspato é o principal fator que controla as propriedades mecânicas das rochas.
- Através de análise estatística, significantes correlações foram encontradas entre densidade e porosidade, resistência ao impacto de corpo duro e resistência à compressão uniaxial, resistência à tração e resistência à compressão uniaxial, módulo de elasticidade e resistência à compressão uniaxial.

CITRAN (2000) estudou alguns granitos utilizados em serrarias italianas, esse autor fez um estudo para correlacionar as características mecânicas dos granitos com a serrabilidade em tear multilâminas à polpa abrasiva. O autor concluiu que há uma relação bastante evidente entre a serrabilidade e a resistência à compressão uniaxial e com a resistência à tração/flexão. Concluiu-se que a serrabilidade diminui com o aumento dessas resistências.

CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA

Os ensaios e análises realizados nesse trabalho foram desenvolvidos nos laboratórios do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Engenharia da UFMG e no Instituto de Geociências dessa universidade. As amostras de granito, quartzito e ardósia foram obtidas em marmorarias. As amostras de quartzito são de Ouro Preto/MG e as de granito e ardósia do estado do Espírito Santo. Tais materiais foram escolhidos para o estudo tendo em vista a importância econômica da produção de rochas ornamentais a partir deles.

Não foi possível obter blocos de granito e ardósia para o ensaio de compressão uniaxial, portanto esse ensaio foi realizado somente com o quartzito. Para o ensaio de resistência à flexão, só foram obtidas placas de quartzito e ardósia com as dimensões necessárias.

4.1 - Materiais

O material foi encaminhado aos Laboratórios Tecnologia de Rochas do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG, onde foram realizados os testes.

Para a análise petrográfica, as amostras destinadas para tal fim, foram encaminhadas ao Instituto de Geociências (IGC) da UFMG.

4.2 - Métodos

Amostras de quartzito, granito e ardósia foram submetidas a alguns testes para conhecimento de suas propriedades mineralógicas, petrográficas, químicas e mecânicas. Essa caracterização possibilitou relacionar a influência das propriedades das rochas nas variáveis estudadas no processo de corte.

Desgaste e energia são dois itens importantes no custo de corte de rochas com disco diamantado (BUYUKSAGIS, 2007). No presente estudo avaliou-se o consumo de energia e de água no corte de algumas rochas ornamentais. Considerando a energia específica de corte como o principal critério de performance do corte, para a otimização

da velocidade de corte, foram considerados alguns valores para a velocidade periférica e profundidade de corte, afim de avaliar a relação destas com o consumo de energia. Algumas propriedades físicas, químicas e geomecânicas das rochas também foram relacionadas com o desgaste e o consumo de energia para verificar a influência das propriedades das rochas nos parâmetros avaliados.

Não foi possível variar o modo de corte, alternando-se entre cortar a rocha em uma direção, depois na direção oposta (modo up-cutting e down-cutting). Quando se tentava cortar no modo down cutting, a rocha era puxada pelo disco e esse era desenroscado da máquina.

4.2.1 – Caracterização tecnológica

4.2.1.1 - Análise petrográfica

Com base nas diretrizes da norma ABNT/NBR 12768-1992, as amostras de granito, quartzito e ardósia foram caracterizadas microscópica e macroscopicamente em relação à sua composição mineralógica. Foram utilizadas duas amostras para o quartzito, devido às diferenças visíveis em relação à cor das amostras e uma amostra para cada uma das demais rochas. Foram selecionadas amostras representativas dos três tipos de rochas, preparou-se uma lâmina delgada para cada amostra.

Foi utilizado para a análise um microscópio da marca Carl Zeiss, modelo Axioskop 40. Foram tiradas fotografias de cada lâmina nesse microscópio.

4.2.1.2 - Índices físicos – densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água

No setor de rochas ornamentais, os índices físicos considerados abrangem a massa específica aparente, absorção de água e porosidade aparente.

Os índices físicos foram determinados segundo a norma NBR 12766/1992 (Rochas para Revestimento – Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção d'água aparente).

Foram selecionadas 10 amostras de cada rocha com peso aproximado de 250g e alturas semelhantes. As amostras foram lavadas, secadas e colocadas em estufa por 24 horas, para a secagem total. Após as amostras serem retiradas da estufa e esfriarem, foram pesadas (peso A).

Em seguida, as amostras foram colocadas em uma bandeja e adicionou-se água até 1/3 de sua altura, após 4 horas, adicionou-se mais água até 2/3 de sua altura e após 4 horas, completou-se o volume de água até a altura total. Após 24 horas em que as amostras ficaram submersas, essas foram retiradas da bandeja, secadas e pesadas (peso B), foram também pesadas na condição submersa utilizando-se o dispositivo da balança para pesagem hidrostática, amarrando-se o corpo de prova com fio de massa desprezível (peso C).

Os índices físicos podem ser obtidos através das seguintes equações:

A massa específica aparente seca foi determinada através da seguinte equação:

$$\rho_{asec} = A / B - C \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (4.1)$$

Massa específica aparente saturada:

$$\rho_{a_{sat}} = B / (B - C) \quad (4.2)$$

Porosidade aparente:

$$\eta_a = (B - A) / (B - C) \times 100 \quad (4.3)$$

Absorção d'água aparente:

$$\alpha_a = (B - A) / A \times 100 \quad (4.4)$$

4.2.1.3 - Desgaste Amsler

Esse ensaio foi realizado com base nas diretrizes da norma ABNT MB 3379.

O teste Amsler mede a resistência dos materiais frente à solicitação abrasiva, o desgaste do corpo de prova é feito através do atrito entre a sua superfície e a superfície de um anel de ferro fundido, continuamente abastecido com material abrasivo (areia seca de granulometria 0,03mm), sendo a areia colocada nos funis de armazenamento da máquina Amsler (Figura 4.1). Foram utilizados dois corpos de prova de dimensões de 7 x 7 x 2,5 cm. Inicialmente, pesou-se os corpos, e mediu-se as alturas em 4 pontos. Os corpos foram acoplados no aparelho, sendo submetidos a 250 voltas (500 m), após as quais, mediu-se novamente o peso e a altura em 4 pontos, inverteu-se a posição dos corpos e os mesmos foram submetidos a mais 250 ciclos. A medida de desgaste, expressa em milímetros, é aferida após 250 e 500 giros da roda de fixação dos corpos de prova no equipamento de ensaio.



Figura 4.1: Máquina Amsler (Laboratório de Tecnologia de Rochas – Escola de Engenharia/UFMG)

4.2.1.4 – Resistência à compressão uniaxial

É determinada segundo a norma ABNT/NBR 12767. Foram utilizados 5 corpos de prova (Figura 4.2) de quartzito, que foram colocados em uma prensa hidráulica servocontrolada (Figura 4.3).



Figura 4.2: Corpos de prova de quartzito utilizados no teste de compressão uniaxial



Figura 4.3: Prensa servocontrolada (Laboratório de Tecnologia de Rochas – Escola de Engenharia/UFMG)

Os valores do diâmetro e altura dos corpos de prova utilizados estão listados na Tabela IV.1.

Tabela IV.1: Diâmetro e altura dos corpos de prova utilizados no ensaio de compressão uniaxial

Copro de prova	Diâmetro (mm)	Altura (mm)
1	53,70	122,45
2	53,65	139,65
3	53,45	138,80
4	53,45	139,30
5	53,50	143,45

O corpo de prova foi submetido a uma tensão normal. Com esse ensaio foi obtido o valor da resistência à compressão uniaxial (σ_c) e de elasinidaticamente a rocha através do módulo de elasticidade (E), e o coeficiente de Poisson (ν).

Após feita uma regressão linear na curva tensão versus deformação, o módulo de deformabilidade (elasticidade ou de Young) (E) é obtido pelo coeficiente angular da reta tensão versus deformação (equação 4.5).

$$E = \sigma / \varepsilon \quad (4.5)$$

Onde:

σ : tensão aplicada (Pa);

ε : deformação axial produzida (adimensional)

O coeficiente de Poisson (ν) é dado pela razão entre as deformações laterais e longitudinais, é definido pela equação 4.6:

$$\nu = -\varepsilon_t / \varepsilon_l \quad (4.6)$$

O valor da resistência à compressão uniaxial (σ_c) corresponde ao valor máximo da tensão normal aplicada até a ruptura do corpo de prova, é expressa como a relação entre força máxima de ruptura (F) aplicada e a área (A) da base do corpo de prova:

$$\sigma_c = F/A \quad (4.7)$$

Onde:

σ_c : resistência à compressão uniaxial (N/m² ou Pa);

F: força aplicada (N);

A: área da base (m²).

Os corpos de prova foram extraídos perpendicularmente à foliação da rocha.

4.2.1.5 – Resistência à flexão

A resistência à flexão foi determinada segundo a norma ABNT NBR 12763. Foram utilizados três corpos de prova para o quartzito (Figura 4.4) e a mesma quantidade para a ardósia (Figura 4.5).



Figura 4.4: Corpos de prova de quartzito utilizados no ensaio de resistência à flexão

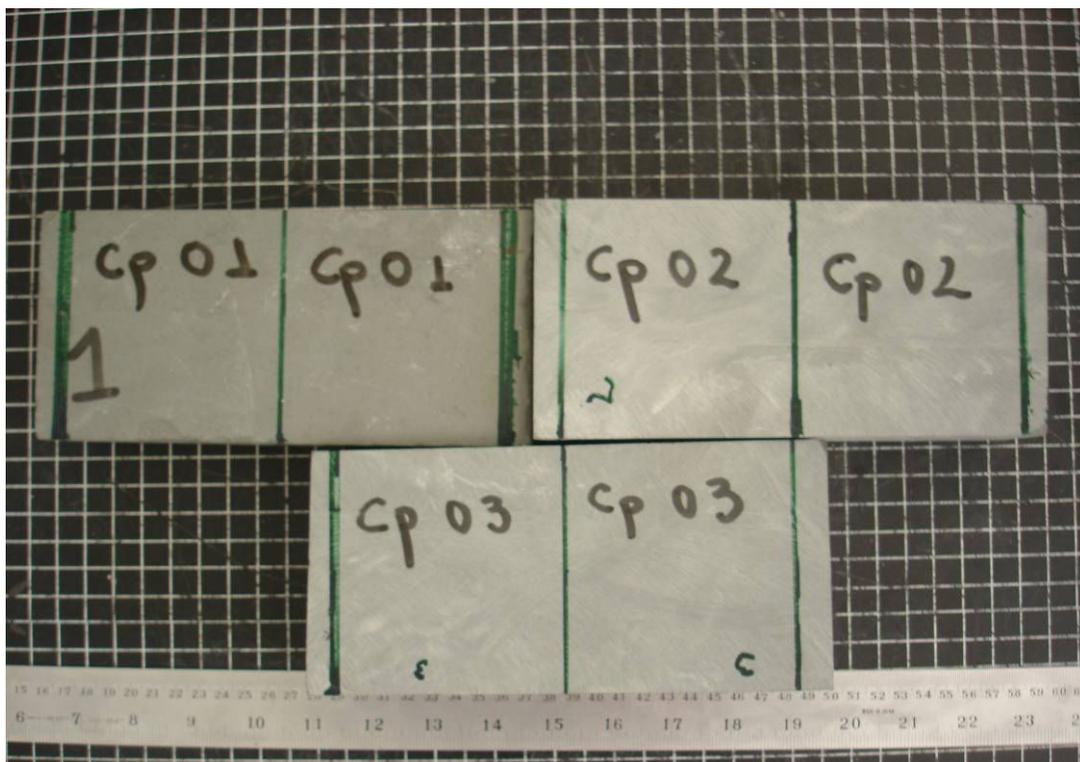


Figura 4.5: Corpos de prova de ardósia utilizados no ensaio de resistência à flexão

A força foi aplicada em sentido perpendicular à foliação.

Traçou-se uma linha na seção transversal no meio do comprimento do corpo de prova e duas linhas paralelas, a 9cm dessa linha inicial.

Cada corpo de prova foi assentado sobre os cutelos inferiores (Figura 4.6), nas posições correspondentes às linhas demarcadas a 9cm da linha média.

O cutelo superior foi assentado na posição correspondente à linha média traçada no corpo de prova, apliando-se pequena carga inicial para obter a estabilização do sistema corpo de prova/cutelos/prensa.

O carregamento foi efetuado de modo lento e progressivo até ocorrer a rotura do corpo de prova.

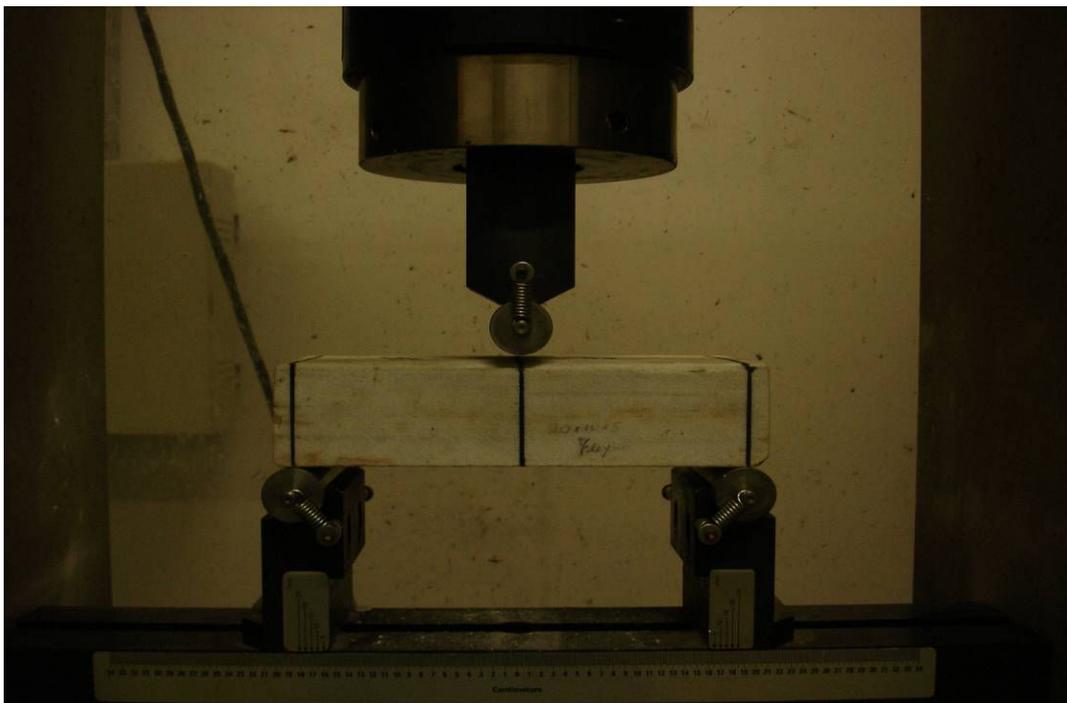


Figura 4.6: Corpo de prova na prensa para a realização do ensaio de flexão

A tensão de ruptura por tração na flexão (σ_t) é calculada através da equação 4.8:

$$\sigma_t = 3/2 PL/bd^2 \quad (4.8)$$

Onde:

P: força de ruptura (N);

L: distância entre as duas linhas extremas traçadas no corpo de prova (cm) ou (m);

b: largura do corpo de prova (cm) ou (m);

d: altura do corpo de prova (cm) ou (m).

4.2.1.6 – Testes de corte

Cada tipo de rocha (quartzito, granito e ardósia), foi submetida aos ensaios de corte, que foram realizados variando-se alguns parâmetros, como profundidade de corte, taxa de alimentação e rotação, com o propósito de se calcular a energia gasta para o corte.

A base para os testes foi a equação já citada (3.5) para cálculo de energia específica.

Para-se obter uma velocidade aproximadamente constante, aplicou-se pesos ao carrinho de corte por meio de um cabo e roldana (Figura 4.7). Os valores das forças utilizadas foram obtidos experimentalmente, variando-se os pesos entre 7 a 10N, para obter valores ideais para cada corte.



Figura 4.7: Serra diamantada (Laboratório de Tecnologia de Rochas – Escola de Engenharia/UFMG)

Foram utilizados 3 valores de velocidade periférica, abaixo do valor da velocidade máxima recomendada pelo fabricante do disco diamantado. A variação da velocidade periférica foi obtida pela inversão da frequência do motor, utilizando-se um inversor de frequência da marca Weg (Figura 4.8), instalado em um motor da mesma marca.



Figura 4.8: Inversor de frequência

Para o inversor de frequência funcionar, foi necessário alimentá-lo com os dados do motor, são eles:

Frequência: 60Hz

Voltagem: 220V

Corrente: 6,5A

Potência: 2cv

Fator de potência: 0,62

Utilizou-se um disco diamantado (Figura 4.9) específico para cada tipo de rocha.



Figura 4.9: Disco diamantado

A Figura 4.10 ilustra o momento inicial do corte de uma amostra de granito.



Figura 4.10: Corte de uma amostra de granito

Os testes para cada tipo de rocha foram realizados de acordo com as Tabelas IV.2 e IV.3. Foram realizados 12 testes variando-se a velocidade periférica e a profundidade de corte e 8 testes com a mesma velocidade periférica, cortando-se em 2 profundidades diferentes.

Tabela IV.2: Testes realizados

Teste	Velocidade periférica (m/s)	Profundidade de corte (cm)
1	26,18	0,50
2		1,00
3		1,50
4		2,00
5	35,34	0,50
6		1,00
7		1,50
8		2,00
9	44,77	0,50
10		1,00
11		1,50
12		2,00

Tabela IV.3: Testes realizados para as profundidades 1,0 e 1,5cm

Teste	Velocidade periférica (m/s)	Profundidade de corte (cm)
1	26,18	0,50
2		0,50
3		0,50
4		0,50
5		1,00
6		1,00
7		1,00
8		1,00

Após cada teste, foram anotados o tempo e o torque. Foram calculadas: a taxa de alimentação, a taxa de remoção específica (equação 3.4), a energia específica (equação 3.5) e a força tangencial.

O inversor de frequência fornece o valor do torque como uma porcentagem do torque nominal do motor que tem valor de 8,32N. A partir da porcentagem sobre esse torque, calculou-se o torque em cada corte e o valor da força tangencial foi calculada dividindo-se o valor desse torque pelo raio do disco.

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 – Análise petrográfica

- Quartzito

As amostras de quartzito foram denominadas QOPI e QOP 2.

QOPI

A Figura 5.1 é uma fotomicrografia da amostra utilizada.

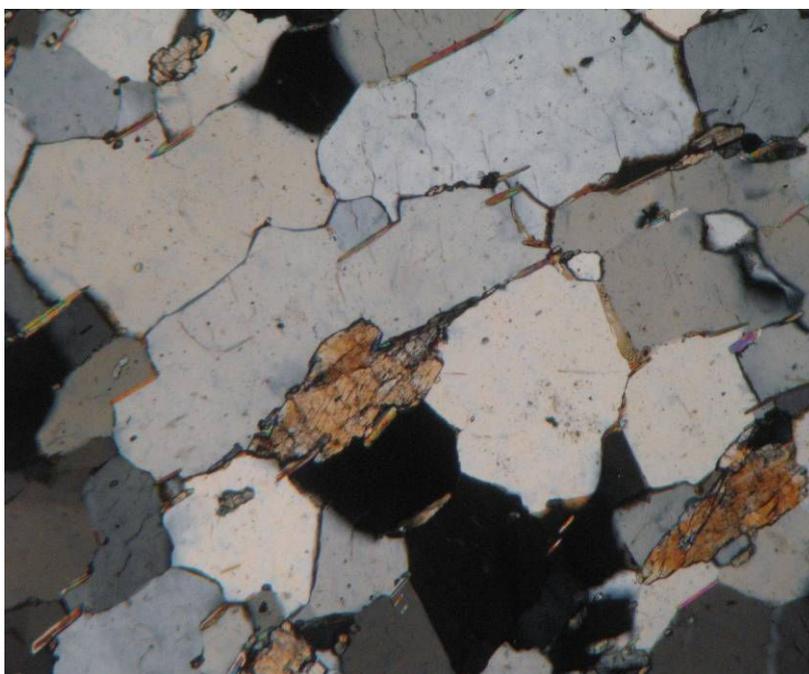


Figura 5.1: Foto em microscópio sob luz polarizada com aumento de 100 vezes - QOPI

Caracterização Macroscópica

Cor no estado úmido: predominância da coloração avermelhada;

Cor no estado seco: a rocha apresenta coloração avermelhada, levemente rosada;

Estrutura: a rocha apresenta acamamento fino, pouco pronunciado;

Caracterização Microscópica

Análise textural:

A rocha apresenta textura clástica, com foliação denotada pelos minerais prismáticos micáceos alongados conferindo orientação à rocha. Verifica-se predomínio da porção de cristais em relação à matriz;

- Mineralogia

Essencial

O quartzo ocorre na forma de cristais euédricos asubédricos, mostrando granulação variando de fina a média;

Acessória

A muscovita ocorre na forma de cristais euédrico a subédricos, conferindo orientação a rocha.

Secundária

Hematita e hidróxidos de Fe, ocorrem como produto de alteração dos opacos.

Hidróxido de Fe ocorre ainda entre os cristais de quartzo conferindo a coloração avermelhada à rocha.

Estimativa visual

A porcentagem dos principais minerais constituintes do quartzito foi estimada com base em análise visual (Tabela V.1):

Tabela V.1: Estimativa visual para a constituição mineralógica da amostra QOP1

Mineralogia	%
Quartzo	88,0
Muscovita	10,0
Opacos	2,0

QOP2

A Figura 5.2 é uma fotomicrografia da amostra utilizada.

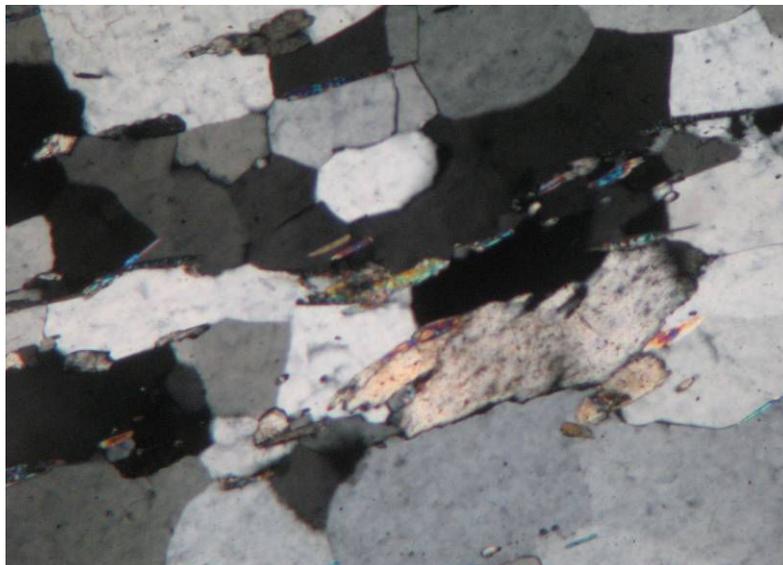


Figura 5.2: Foto em microscópio sob luz polarizada com aumento de 100 vezes - QOP2

Caracterização macroscópica

Cor no estado úmido: predominância da coloração branca;

Cor no estado seco: a rocha apresenta coloração branca, levemente esverdeada;

Estrutura: a rocha apresenta acamamento fino, pouco pronunciado;

Caracterização microscópica

- Análise textural

A rocha apresenta textura clástica, com foliação denotada pelos minerais prismáticos micáceos alongados conferindo orientação à rocha. Verifica-se predomínio da porção de cristais em relação à matriz.

- Mineralogia

Essencial

O quartzo ocorre na forma de cristais subédricos, mostrando granulação variando de fina a média;

Acessória

A muscovita ocorre na forma de cristais euédrico a subédricos, conferindo orientação a rocha.

Secundária

Hidróxidos de Fe e hematita ocorrem como produto de alteração dos opacos .

Estimativa visual

A porcentagem dos principais minerais constituintes do quartzito foi estimada com base em análise visual (Tabela V.2):

Tabela V.2: Estimativa visual para a constituição mineralógica da amostra QOP2

Mineralogia	%
Quartzo	87,0
Muscovita	12,0
Opacos	1,0

- **Granito**

A Figura 5.3 é uma fotomicrografia da amostra utilizada.

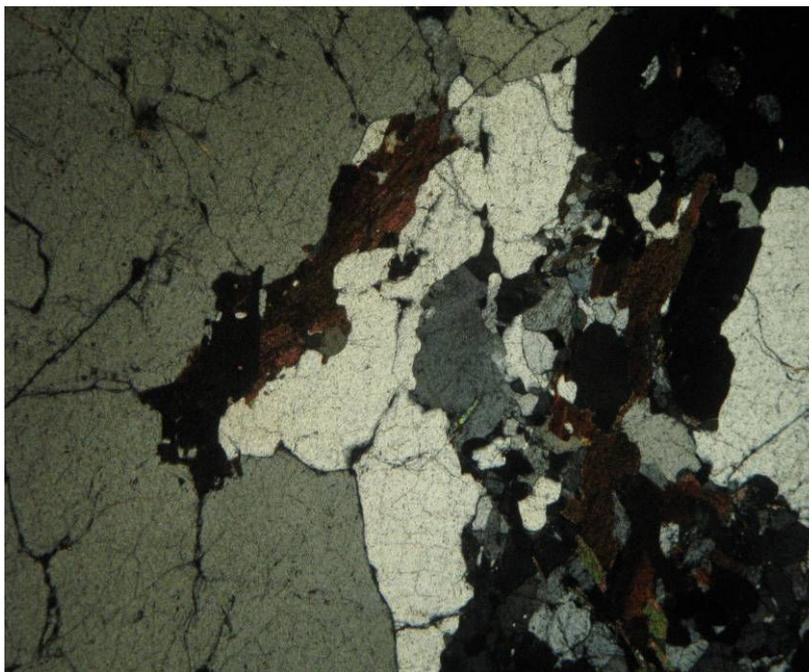


Figura 5.3: Foto em microscópio sob luz polarizada com aumento de 25 vezes - granito

Caracterização Macroscópica

A rocha apresenta cor predominante branca com tonalidades escuras, granulagem variada, apresentando orientação dos megacristais de feldspato e foliação denotada pelos minerais máficos.

Caracterização Microscópica

- Análise Textural:

A rocha é inequigranular apresentando estruturas mirmequíticas; predominam os contatos interlobados e côncavos-convexos.

- Mineralogia

Essencial

Plagioclásio, quartzo, feldspato – (k), granada e biotita.

Acessória

Apatita, zircão e opacos

Secundária

Carbonato, muscovita e quartzo (na forma de mirmequita)

Descrição

O plagioclásio é o mineral dominante em megacristais alongados; alguns apresentam-se fraturados e alterados para carbonato e muscovita. O quartzo é o segundo mineral mais abundante, possuindo extinção ondulante e bordas corroídas, estando ainda presente na forma arredondada, incluso nos feldspatos. O feldspato – (k) é microclina ou ortoclásio.. A biotita apresenta pleocroísmo do marrom ao castanho. São comuns as estruturas mirmequíticas.

- **Ardósia**

A Figura 5.4 é uma fotomicrografia da amostra utilizada.

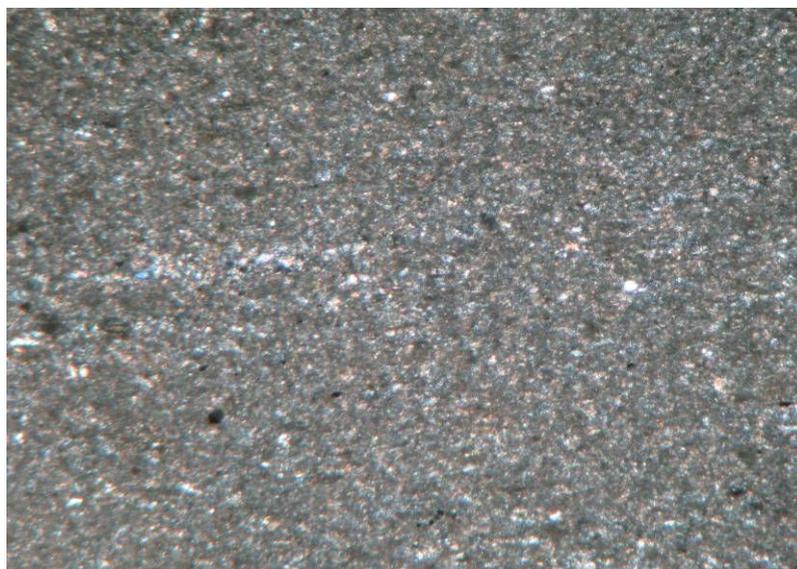


Figura 5.4: Foto em microscópio sob luz polarizada com aumento de 100 vezes – ardósia

Caracterização Macroscópica

Cor no estado úmido: predominância da coloração cinza/azulada;

Cor no estado seco: a rocha apresenta coloração acinzentada;

Estrutura: a rocha apresenta acamamento fino, pouco pronunciado;

Caracterização Microscópica

Análise textural:

A rocha apresenta textura granoblástica, com foliação denotada pelos minerais placóides, como as micas. Os grãos dos minerais que a compõe, apresentam granulação muito fina.

Mineralogia e estimativa visual

Os principais minerais que compõem a amostra de ardósia são: quartzo, carbonato, feldspato, clorita e pirita. Os pontos pretos verificados na Figura 5.4, representam pirita neoformada, onde o ferro é oxidado devido à matéria carbonosa.

Como os grãos dos minerais que constituem a ardósia são muito finos e a textura é granoblástica, é difícil fazer uma estimativa visual da quantidade de cada mineral que a compõe.

5.2 - Índices físicos

- **Quartzito**

Os índices físicos obtidos para quartzito estão o listados na Tabela V.3:

Tabela V.3: Índices físicos do quartzito

Amostras	Massa A (g)	Massa B (g)	Massa C (g)	$\rho_{a_{sec}}$ (Kg/m ³)	$\rho_{a_{sat}}$ (Kg/m ³)	η_a (%)	α_a (%)
1	218,50	219,24	137,53	2674	2683	0,91	0,34
2	202,12	202,90	127,27	2672	2683	1,03	0,39
3	215,39	215,60	135,07	2675	2677	0,26	0,10
4	216,42	216,61	136,93	2716	2718	0,24	0,09
5	224,50	224,67	142,11	2719	2721	0,21	0,08
6	211,22	211,47	133,57	2711	2715	0,32	0,12
7	229,93	230,15	145,63	2720	2723	0,26	0,10
8	215,56	215,74	136,27	2712	2715	0,23	0,08
9	183,55	183,79	116,63	2733	2737	0,36	0,13
10	189,96	190,29	120,74	2731	2736	0,47	0,17
Média				2707	2711	0,43	0,16

Onde:

Massa A: massa do corpo seco;

Massa B: massa do corpo saturado;

Massa C: massa do corpo submerso;

$\rho_{a_{sec}}$: massa específica aparente seca

$\rho_{a_{sat}}$: massa específica aparente saturada;

η_a : Porosidade aparente;

α_a : Absorção d' água aparente.

- **Granito**

Os índices físicos obtidos para o granito estão listados na Tabela V.4:

Tabela V.4: Índices físicos do granito

Amostras	Massa A (g)	Massa B (g)	Massa C (g)	$\rho_{a_{sec}}$ (Kg/m ³)	$\rho_{a_{sat}}$ (Kg/m ³)	η_a (%)	α_a (%)
1	270,92	271,30	169,20	2653	2657	0,37	0,14
2	271,04	271,43	168,23	2626	2630	0,38	0,14
3	231,18	231,51	145,09	2675	2679	0,38	0,14
4	247,49	247,80	154,55	2654	2657	0,33	0,13
5	266,91	267,26	166,42	2647	2650	0,35	0,13
6	263,51	263,79	163,98	2640	2643	0,28	0,11
7	239,00	239,21	149,29	2658	2660	0,23	0,09
8	236,21	236,48	147,82	2664	2667	0,30	0,11
9	241,42	241,79	151,07	2661	2665	0,41	0,15
10	240,49	240,84	150,54	2663	2667	0,39	0,15
Média				2654	2658	0,34	0,13

- **Ardósia**

Os índices físicos obtidos para a ardósia estão listados na Tabela V.5:

Tabela V.5: Índices físicos da ardósia

Amostras	Massa A (g)	Massa B (g)	Massa C (g)	$\rho_{a_{sec}}$ (Kg/m ³)	$\rho_{a_{sat}}$ (Kg/m ³)	η_a (%)	α_a (%)
1	257,07	257,34	163,23	2732	2734	0,29	0,11
2	223,21	223,49	141,76	2731	2734	0,34	0,13
3	234,71	235,02	149,05	2730	2734	0,36	0,13
4	224,46	224,75	142,55	2731	2734	0,35	0,13
5	212,25	212,56	134,84	2731	2735	0,40	0,15
6	203,65	203,93	129,37	2731	2735	0,38	0,14
7	228,26	228,57	145,00	2731	2735	0,37	0,14
8	235,45	235,80	149,56	2730	2734	0,41	0,15
9	208,42	208,66	132,38	2732	2735	0,31	0,12
10	272,49	272,86	173,07	2731	2734	0,37	0,14
Média				2731	2735	0,36	0,13

Comparação entre os índices físicos dos três tipos de rocha

Densidade aparente seca (à esquerda) e densidade aparente saturada (à direita) (Figura 5.5)

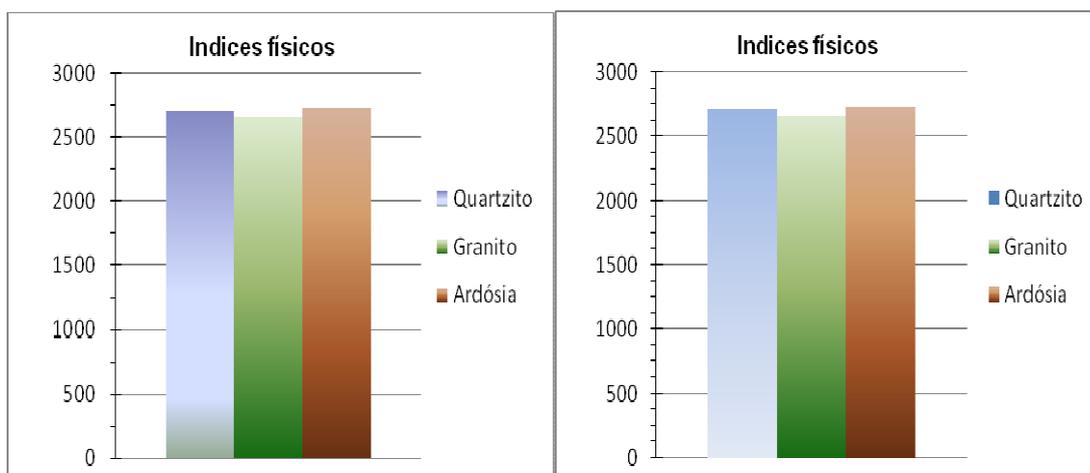


Figura 5.5: Densidade aparente seca (à esquerda) e densidade aparente saturada (à direita) para granito, quartzito e ardósia

- Porosidade e absorção d'água (Figura 5.6)

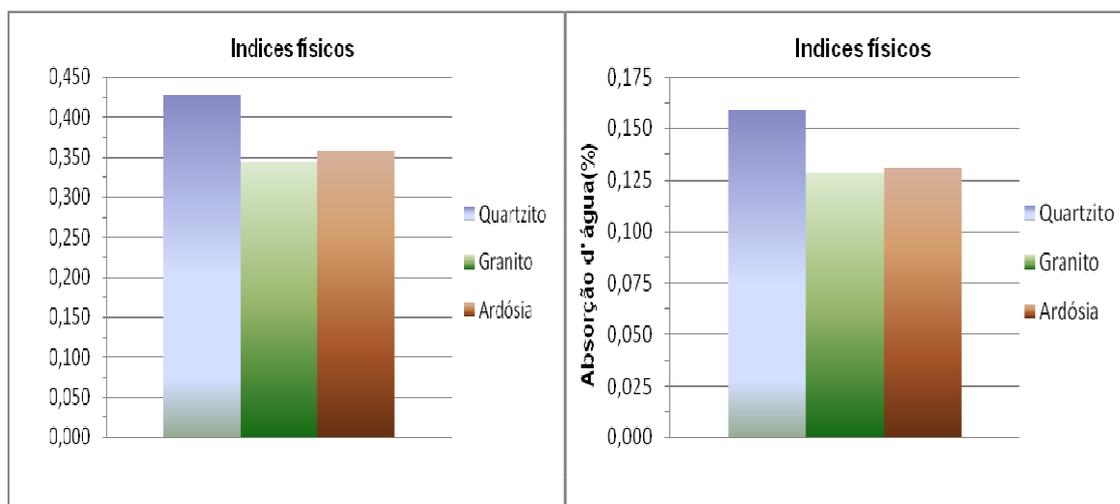


Figura 5.6: Porosidade (à esquerda) e absorção d'água (à direita) para granito, quartzito e ardósia

O valor de densidade aparente seca e densidade aparente saturada decresce da ardósia para o granito, se a densidade fosse considerada isoladamente como o principal fator que influencia o corte, esperava-se que o quartzito fosse mais denso, seguido da ardósia e granito. Seguindo o mesmo raciocínio, esperava-se que o quartzito fosse menos

poroso e absorvesse menos água que as outras duas rochas, mas é a rocha mais porosa e com maior índice de absorção de água.

Ao se comparar o granito com as outras duas rochas, com relação à densidade aparente seca e saturada, observa-se que o granito possui valor mais baixo. Considerando os índices físicos como fatores que influenciam o corte, o granito, com relação à densidade, foi a única rocha que teve o comportamento esperado no corte, ou seja, gastou-se menos tempo e energia. Quanto à porosidade, é a rocha menos porosa, porém, a mais fácil de cortar, não se comportou de acordo com o esperado com relação a esse índice físico.

Embora o quartzito seja menos denso e mais poroso que a ardósia, o tempo gasto para cortá-lo e a energia gasta foram maiores na maioria dos testes, comparando-se resultados em que as variáveis são as mesmas. Isso se deve ao fato de que há outros fatores que devem ser levados em conta, como dureza, composição da rocha, matriz de cimentação e tamanho dos grãos. O quartzito possui grãos maiores que a ardósia, maiores grãos são mais difíceis de cortar e a heterogeneidade entre o tamanho desses grãos também torna o corte irregular. O quartzito é constituído majoritariamente por quartzo, esse mineral é bem mais duro que a ardósia, ou seja, é mais difícil de ser arranhado e de arrancar partículas dele.

Se a comparação fosse feita entre três rochas do mesmo tipo, poderia-se esperar que o mais denso fosse mais difícil de cortar, ou seja, gastasse mais tempo e maior energia.

Cada tipo de rocha foi cortada com um disco específico para ela, o fabricante já levou em conta as características de cada tipo de rocha, devido a isso, os índices físicos não influenciaram muito no corte das rochas.

5.3 - Desgaste Amsler

O desgaste em mm, para cada tipo de rocha, após 500m e 1000m percorridos, é apresentado na Tabela V.6 e Figura 5.7

Tabela V.6: Desgaste em mm para quartzito, granito e ardósia

Desgaste (mm)				
Amostras	Distância	Quartzito	Granito	Ardósia
1	500m	0,17	0,35	1,40
	1000m	0,82	0,48	3,53
2	500m	0,42	0,85	4,55
	1000m	1,02	1,23	6,65

Segundo FRAZÃO e FARJALLAT (1995), o padrão de desgaste para rochas que contem sílica, é em torno de 1,0 mm, observa-se pela Tabela V.6 e Figura 5.7, que os valores de desgaste para o granito e quartzito estão em torno desse valor.

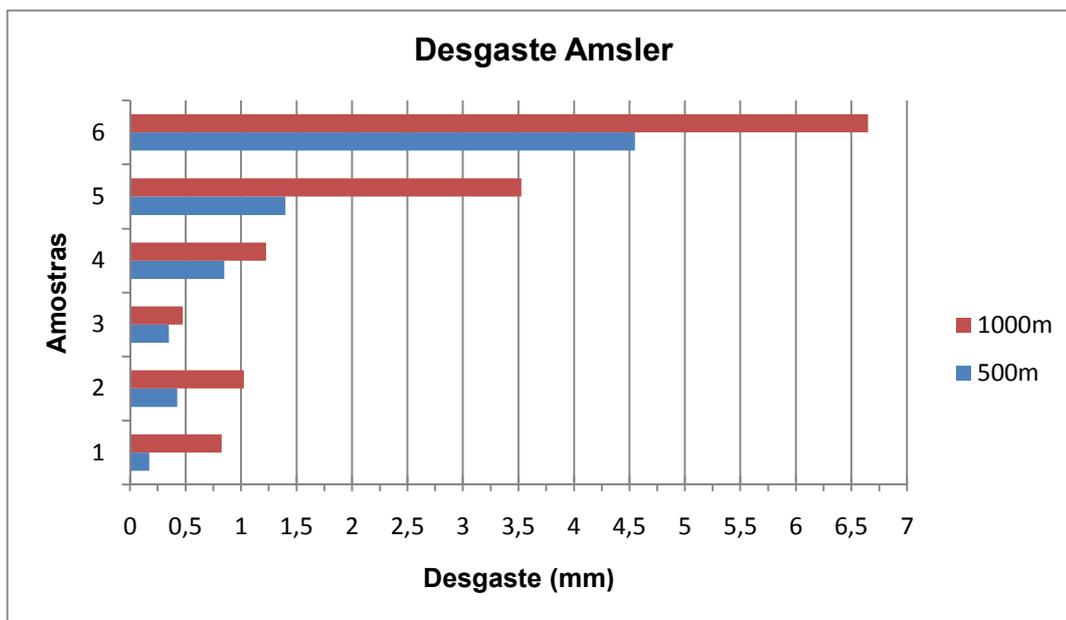


Figura 5.7: Desgaste Amsler em relação a altura para granito, quartzito e ardósia, considerando após percorrer 500 e 1000m

A numeração das amostras se refere a:

1 e 2: Quartzito

3 e 4: Granito

5 e 6: Ardósia

Observa-se que o desgaste da ardósia foi bem maior em relação ao quartzito e granito, isso se deve ao fato de a ardósia conter minerais menos duros do que os minerais que compõem o granito e quartzito. Esse fator influenciou no corte, o corte da ardósia foi mais fácil do que do quartzito. Porém, ao se comparar a ardósia com o granito, verifica-se que o desgaste dela é maior, porém foi mais difícil de cortá-la, pois outros fatores devem ser levados em consideração.

5.4 - Resistência à compressão uniaxial

A Figura 5.8 ilustra os corpos de prova após serem rompidos.



Figura 5.8: Corpos de prova rompidos durante o ensaio de resistência à compressão uniaxial

O corpo de prova 3 possuía fissuras paralelas à força aplicada e o corpo de prova 2, possuía fissuras perpendiculares à força aplicada e também uma paralela.

O resultado dos testes, onde foram a tensão e deformação foram relacionadas graficamente, estão ilustrados nas Figuras 5.9, 5.10 e 5.11 e Tabela V.7.

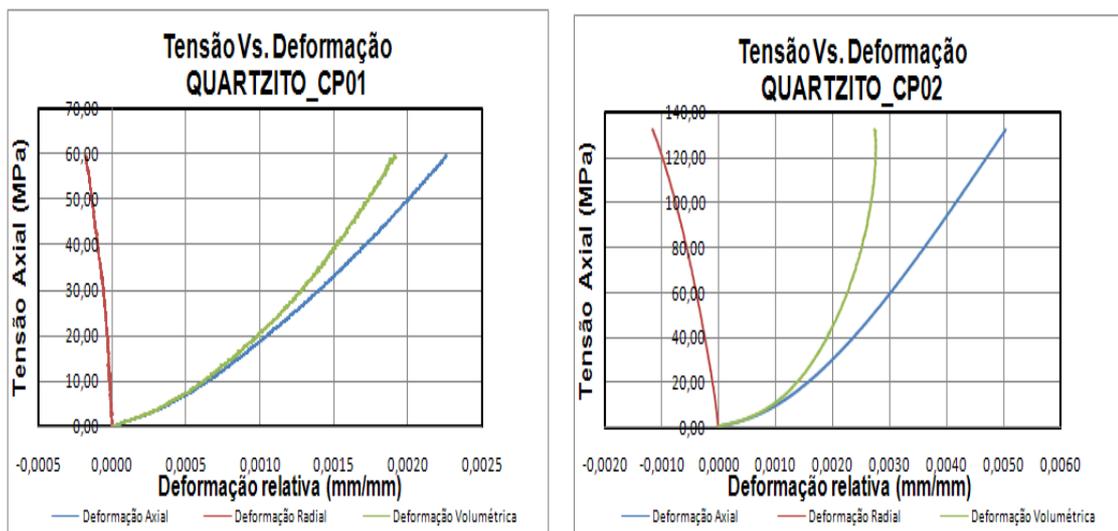


Figura 5.9: Gráfico tensão x deformação para os corpos de prova 1 (à esquerda) e 2 (à direita) – Ensaio de resistência à compressão uniaxial

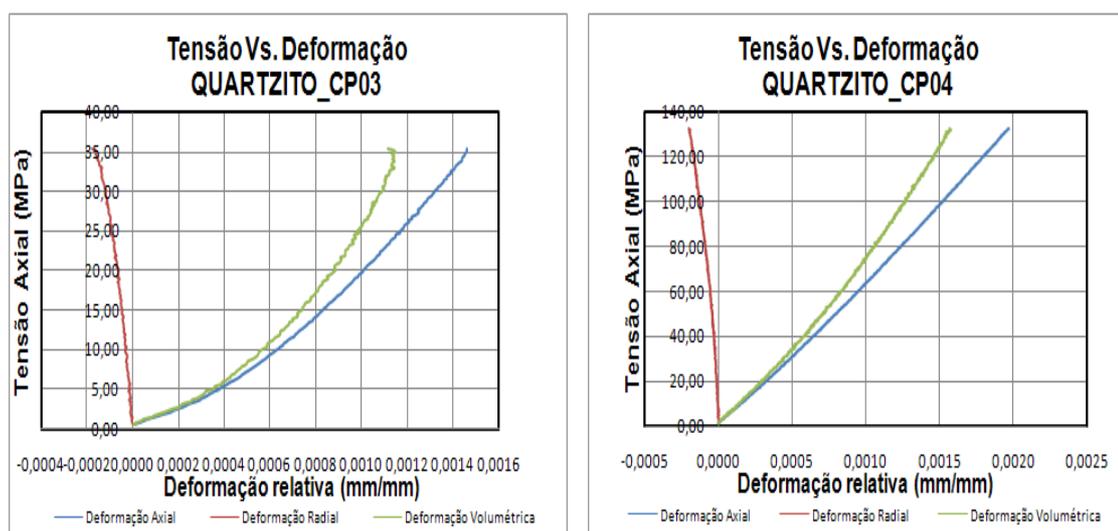


Figura 5.10: Gráfico tensão x deformação para os corpos de prova 3 (à esquerda) e 4 (à direita) – Ensaio de resistência à compressão uniaxial

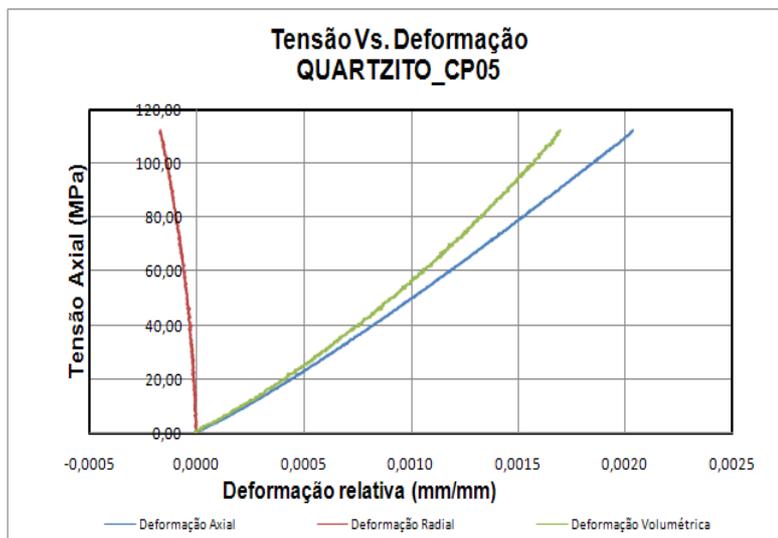


Figura 5.11: Gráfico tensão x deformação para o corpo de prova 5 – Ensaio de resistência à compressão uniaxial

Tabela V.7: Resultado do teste de compressão uniaxial

Corpo de prova	Razão de Poisson	Módulo de Young(Mpa)	Tensão(Mpa)
1	0,106	30,989	213,990
2	0,256	31,548	199,685
3	0,113	27,291	125,333
4	0,110	68,269	292,348
5	0,091	57,274	214,987
Média	0,135	43,074	209,269

Segundo a ASTM C615, há valores mínimos estabelecidos alguns ensaios para as rochas ornamentais em geral e para alguns tipos específicos. FRAZÃO e FARJALLAT (1995) também estabeleceram esses limites. Esses autores obtiveram esses valores em um trabalho técnico no IPT (Instituto de Pesquisas tecnológicas do estado de São Paulo).

Para as rochas ornamentais, em geral, segundo a ASTM, a resistência à compressão uniaxial deve ser maior que 131MPa e segundo FRAZÃO e FARJALLAT (1995), > 100MPa.

Segundo a ASTM C615 (1999), o valor para quartzito deve ser $> 137,9$ MPa e para granito >131 MPa (para rochas utilizadas no revestimento de edificações). Não há valor estabelecido para a ardósia, mas entre os resultados disponíveis na literatura estão: 10,32MPa a (30°) (GOSHTASBY *et al.*, 2006) e 24MPa a 36MPa (Minerals Zone – World Mineral Exchange (2012)).

Como não se realizou o teste de resistência à compressão uniaxial com o granito e ardósia, essa análise foi feita com base em valores disponíveis na literatura. Observa-se que o valor de resistência à compressão uniaxial é maior para o quartzito, seguido do granito e ardósia. Considerando esse índice, o quartzito seria mais difícil para cortar do que o granito e a ardósia mais fácil que essas duas rochas. Comparando-se o resultado dos testes de corte do quartzito e granito, observa-se que o resultado obtido foi o esperado, mas ao se comparar a ardósia com o granito, a relação esperada não foi obedecida.

5. 5 - Resistência à flexão

- Quartzito

Os corpos de prova de quartzito após rompidos no ensaio de flexão estão ilustrados na Figura 5.12.



Figura 5.12: Corpos de prova rompidos após o ensaio de flexão – quartzito

As Figuras 5.13 e 5.14, ilustram os gráficos plotados durante o ensaio de flexão, relacionando **força x deslocamento** para os três corpos de prova.

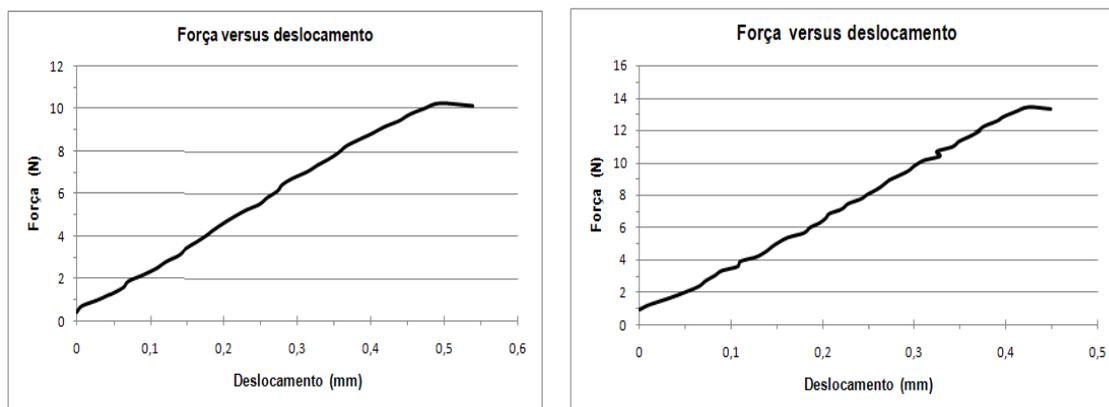


Figura 5.13: Relação força x deslocamento do ensaio de flexão para o quartzito. À esquerda, para o corpo de prova 1 e à direita, corpo 2

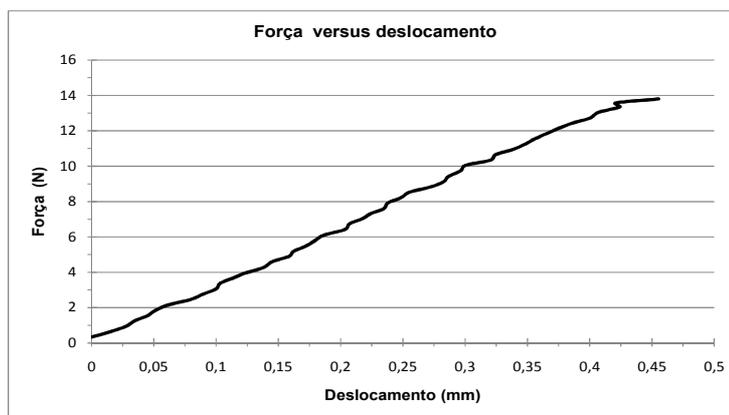


Figura 5.14: Relação força x deslocamento do ensaio de flexão para o quartzito – Corpo de prova 3

As dimensões dos corpos de prova e os resultados dos testes de flexão estão listados na Tabela V.8.

Tabela V.8: Dimensões dos corpos de prova e resultados dos testes de flexão

Corpos	P(N)	L (m)	b (m)	d ² (m)	Resistência à flexão(MPa)
1	10265,20	0,1808	0,0986	0,0024	11,85
2	13420,66	0,1826	0,0992	0,0023	16,09
3	13800,01	0,1815	0,0999	0,0023	16,22
Média					14,72

Significado das siglas:

P: força de ruptura;

L: distância entre as duas linhas extremas traçadas no corpo de prova;

b: largura do corpo de prova

d^2 : altura do corpo de prova em cm

- **Ardósia**

Os corpos de prova rompidos após o ensaio de flexão estão ilustrados na Figura 5.15:



Figura 5.15: Corpos de prova rompidos após o ensaio de flexão – ardósia

A Figura 5.16 ilustra o gráfico plotado durante o ensaio de flexão, relacionando **força versus deslocamento** para o corpo de prova 1, para os corpos de prova 2 e 3, não foi possível plotar o gráfico, pois os mesmos foram rompidos rapidamente, provavelmente devido à alguma fratura.

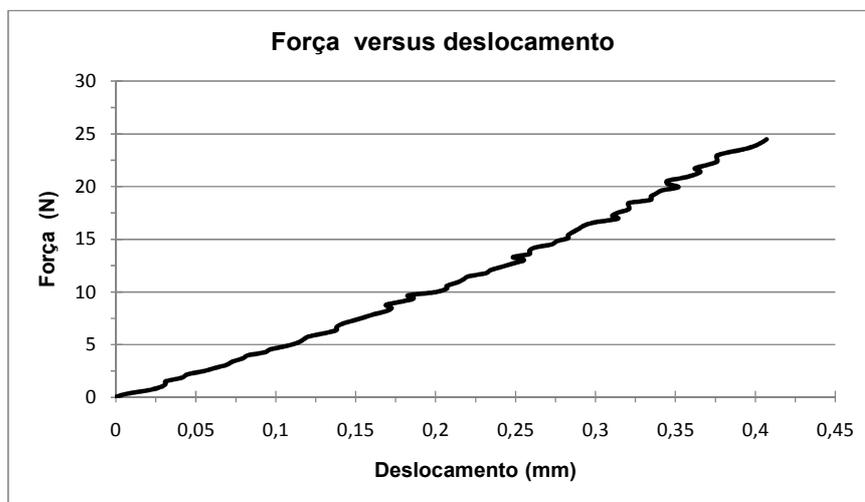


Figura 5.16: Relação força versus deslocamento para ensaio de flexão da ardósia - corpo de prova 1

As dimensões do corpo de prova e os resultados dos testes de flexão estão listados na Tabela V.9.

Tabela V.9: Dimensões do corpo de prova e resultados do teste de flexão

Corpo	P(N)	L(m)	b(m)	d ² (m)	Resistência à flexão(Mpa)
1	24456,16	0,1800	0,0998	0,0018	36,29

Como não se realizou o teste de resistência à compressão uniaxial com o granito, essa análise foi feita com base em valores disponíveis na literatura.

De acordo com ASTM C615 (1999) e de acordo com FRAZÃO e FARJALLAT (1995), os valores de resistência à flexão para as rochas ornamentais, são, respectivamente, >10,4 e >10.

Pela ASTM C615 (1999) o valor para granito deve ser > 10,34; pela ASTM C616, > 13,9 para quartzito e pela ASTM C629, para a ardósia deve ser > 49,6 (quando a força aplicada é paralela à foliação) e > 62,1 (perpendicular à foliação).

A resistência à flexão não tem uma relação direta com os ensaios de corte, pois, a resistência à flexão para a ardósia é bem maior do que do quartzito, e, no entanto, ela é

mais fácil de cortar. A resistência à flexão, depende da coesão dos grãos da rocha, a ardósia possui grãos menores e mais coesos, portanto, mais difíceis de serem separados.

5.6 – Ensaio de corte

Ao se comparar as outras variáveis envolvidas no teste para uma rocha, ou comparar o teste de um tipo de rocha com outra, seria necessário que a taxa de alimentação fosse constante, porém, não foi possível aplicar essa velocidade constante. Portanto, para algumas comparações, a taxa de alimentação é citada, para se levar em conta que a mesma não foi constante e isso teve uma influência nos resultados.

- **Quartzito**

Os parâmetros, observados e calculados estão listados nas Tabelas V.10 e V.11.

Tabela V.10: Testes de corte com o quartzito

Prof(cm)	T(min)	Taxa al(m/min)	Torque(N.m)	F tang(N)	TRE(cm ² /min)	En(MJ/m ³)
0,50	1,69	0,09	3,15	25,21	4,45	593,89
1,00	1,72	0,09	3,12	24,94	8,72	299,60
1,50	1,84	0,08	3,05	24,36	12,21	208,98
2,00	1,97	0,08	3,06	24,50	15,23	168,40
0,50	1,00	0,15	2,71	21,72	7,49	409,74
1,00	1,14	0,13	2,97	23,76	13,17	255,14
1,50	1,25	0,12	3,04	24,35	17,95	191,77
2,00	1,29	0,12	3,10	24,80	23,28	150,58
0,50	1,35	0,11	2,91	23,27	5,54	751,39
1,00	1,25	0,12	3,04	24,35	11,98	363,78
1,50	1,32	0,11	3,08	24,65	17,06	258,79
2,00	1,68	0,09	2,95	23,61	17,86	236,78

Consumo de água: 42,20ml/s

Tabela V.11: Testes de corte com o quartzito para a profundidade de 1,00 e 1,50 cm e velocidade periférica de 26,18m/s

Prof (cm)	T(min)	Taxa al(m/min)	Torque(N.m)	F tang(N)	TRE(cm ² /min)	En(MJ/m ³)
1,00	1,75	0,09	3,21	25,68	8,57	313,70
	1,70	0,09	3,06	24,44	8,80	290,80
	1,68	0,09	3,03	24,28	8,95	284,15
	1,65	0,09	2,77	22,15	9,08	255,52
1,50	1,67	0,09	2,81	22,50	13,49	235,80
	1,81	0,08	2,87	22,92	12,46	260,09
	1,75	0,09	3,20	25,57	12,83	281,74
	1,87	0,08	3,08	24,65	12,02	289,95

Consumo de água: 44,00ml/s

- **Granito**

Os vários parâmetros, observados e calculados estão listados nas Tabelas V.12 e V.13.

Tabela V.12: Testes de corte com o granito

Prof(cm)	T(min)	Taxa al(m/min)	Torque (N.m)	F tang(N)	TRE(cm ² /min)	En(MJ/m ³)
0,50	0,73	0,21	2,89	23,11	10,33	234,20
1,00	0,87	0,17	3,34	26,72	17,23	162,35
1,50	0,91	0,16	3,39	27,12	24,73	114,83
2,00	1,15	0,13	3,41	27,26	26,10	109,38
0,50	0,59	0,26	3,01	24,07	12,81	265,71
1,00	0,54	0,28	3,25	25,97	27,96	131,31
1,50	0,74	0,20	3,24	25,95	30,42	120,59
2,00	1,11	0,13	3,27	26,18	26,98	137,17
0,50	0,61	0,25	2,93	23,44	12,33	340,50
1,00	0,58	0,26	3,06	24,47	25,85	169,45
1,50	0,72	0,21	3,16	25,26	31,40	144,07
2,00	1,07	0,14	2,71	21,65	27,93	138,80

Consumo de água: 48ml/s.

Tabela V.13: Testes de corte com o granito para a profundidade de 1,00 e 1,50 cm e velocidade periférica de 26,18m/s

Prof(cm)	T(min)	Taxa al(m/min)	Torque(N.m)	F tang(N)	TRE(cm ² /min)	En(MJ/m ³)
1,00	0,85	0,18	2,94	23,53	17,72	139,06
	0,84	0,18	3,29	26,30	17,91	153,79
	0,70	0,21	3,34	26,70	21,34	131,04
	0,62	0,24	3,38	27,05	24,21	117,01
1,50	0,81	0,19	3,06	24,49	27,81	124,49
	0,78	0,19	3,25	25,97	28,86	127,22
	1,02	0,15	3,17	25,32	22,06	162,31
	1,14	0,13	3,32	26,59	19,81	189,80

Consumo de água: 49,50ml/s.

- **Ardósia**

Os vários parâmetros, observados e calculados estão listados nas Tabelas V.14 e V.15.

Tabela V.14: Testes de corte com a ardósia

Prof(cm)	T(min)	Taxa al(m/min)	Torque (N.m)	F tang(N)	TRE(cm ² /min)	En(MJ/m ³)
0,50	1,65	0,09	2,72	21,73	4,45	500,75
1,00	1,69	0,09	3,16	25,27	8,72	298,43
1,50	1,80	0,08	3,12	24,96	12,21	209,49
2,00	2,04	0,07	3,10	24,82	15,23	176,35
0,50	0,77	0,19	2,82	22,55	7,49	328,15
1,00	0,97	0,15	2,77	22,17	13,17	202,26
1,50	1,24	0,12	3,44	27,56	17,95	215,35
2,00	1,45	0,10	3,13	25,03	23,28	171,36
0,50	0,72	0,21	3,00	23,99	5,54	411,09
1,00	0,77	0,20	3,33	26,62	11,98	243,81
1,50	0,89	0,17	3,60	28,84	17,06	205,00
2,00	1,02	0,15	3,27	26,16	17,86	159,54

Consumo de água: 34,60ml/s.

Tabela V.15: Testes de corte com a ardósia para a profundidade de 1,00 e 1,50 cm e velocidade periférica de 26,18m/s

Prof(cm)	T(min)	Taxa al(m/min)	Torque (N.m)	F tang(N)	TRE(cm ² /min)	En(MJ/m ³)
1,00	1,50	0,10	3,22	25,72	10,00	269,38
	1,67	0,09	3,12	24,94	8,96	291,36
	1,77	0,08	3,05	24,36	8,47	301,03
	1,92	0,08	2,85	22,80	7,83	305,03
1,50	1,66	0,09	2,71	21,72	13,56	226,45
	1,85	0,08	3,00	23,99	12,15	279,11
	1,94	0,08	3,15	25,18	11,62	306,37
	1,92	0,08	3,10	24,80	11,72	299,05

Consumo de água: 36,70ml/s.

Segue o significado das abreviações:

T – tempo;

Prof – profundidade;

Taxa al - taxa de alimentação;

Torque (N.m);

F tang - força tangencial;

TER – taxa de remoção específica;

En – energia.

A energia calculada é específica, ou seja, por volume, portanto, os altos valores encontrados (J), são para 1m³, para os cortes realizados, como se pode observar, o volume em m³ cortado é muito pequeno, portanto a energia absoluta é menor do que a energia específica calculada.

5.6.1 - Relação da energia específica consumida com as variáveis

5.6.1.1 - Profundidade de corte

Tal nos gráficos refere-se à taxa de alimentação e V_p à velocidade periférica.

- **Quartzito**

A variação da energia específica com a profundidade de corte para cada rotação utilizada está ilustrada nas Figuras 5.17, 5.18 e 5.19.

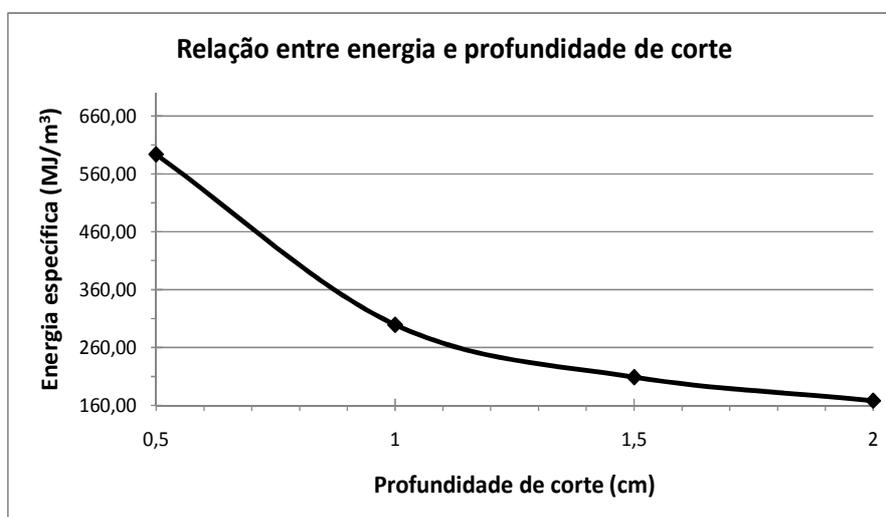


Figura 5.17: Variação da energia específica com a profundidade de corte para quartzito, utilizando-se velocidade periférica de 26,18m/s

$$V_p = 26,18 \text{ m/s}$$

Tal: 0,089; 0,087; 0,081; 0,076 m/min

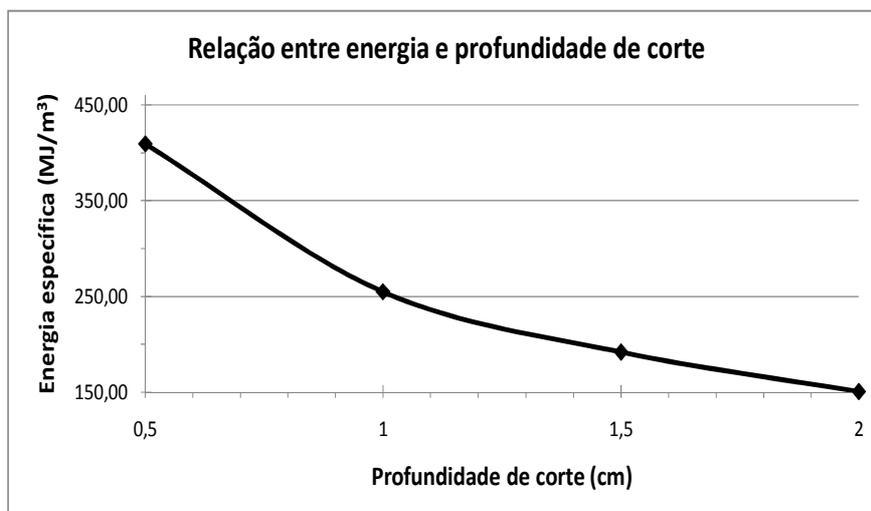


Figura 5.18: Variação da energia específica com a profundidade de corte para quartzito, utilizando-se velocidade periférica de 35,34m/s

$$V_p = 35,34 \text{ m/s}$$

Tal: 0,150; 0,132; 0,120; 0,116 m/min

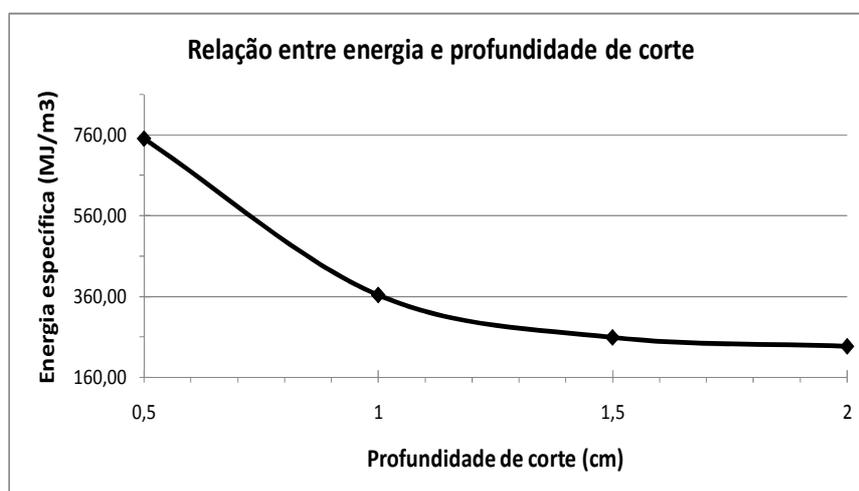


Figura 5.19: Variação da energia específica com a profundidade de corte para quartzito, utilizando-se velocidade periférica de 44,77m/s.

$$V_p = 44,77 \text{ m/s}$$

Tal: 0,089; 0,087; 0,081; 0,076 m/min

- **Granito**

A variação da energia específica com a profundidade de corte para cada rotação utilizada está ilustrada nas Figuras 5.20, 5.21 e 5.22.

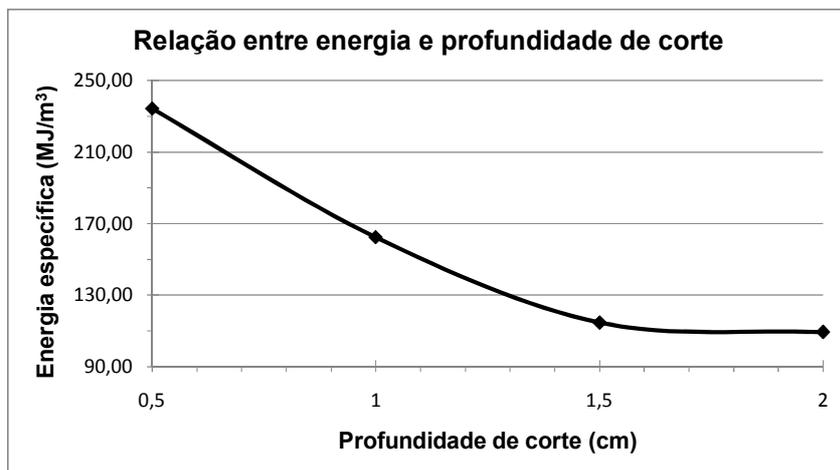


Figura 5.20: Variação da energia específica com a profundidade de corte para granito, utilizando-se velocidade periférica de 26,18m/s

$$V_p = 26,18 \text{ m/s}$$

Tal: 0,207; 0,172; 0,165; 0,131 m/min

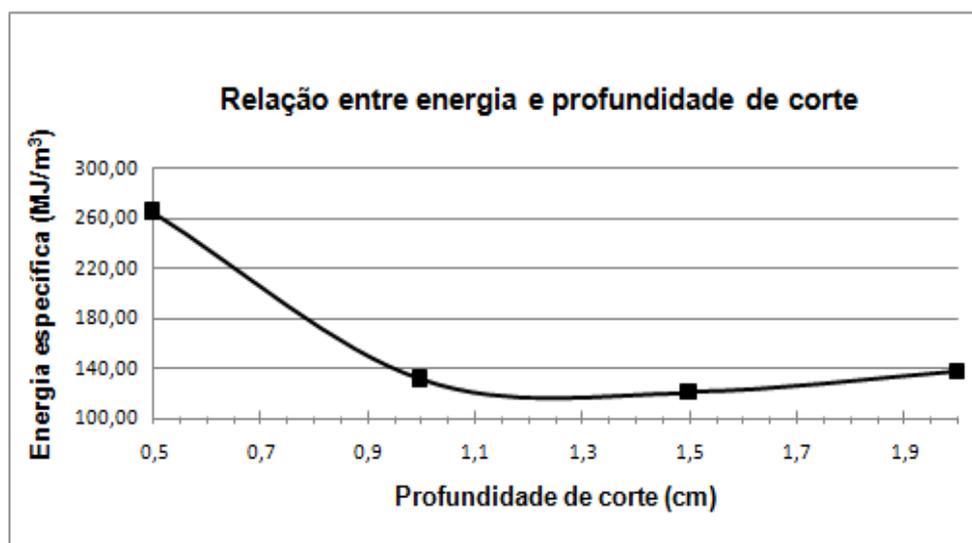


Figura 5.21: Variação da energia específica com a profundidade de corte para granito, utilizando-se velocidade periférica de 35,34m/s

$$V_p = 35,34 \text{ m/s}$$

Tal: 0,256; 0,280; 0,203; 0,135 m/min

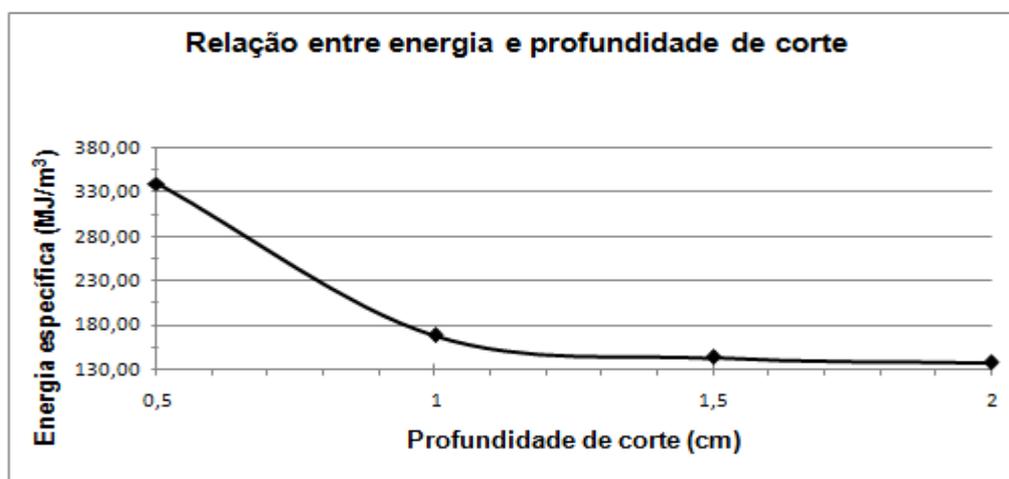


Figura 5.22: Variação da energia específica com a profundidade de corte para granito, utilizando-se velocidade periférica de 44,77m/s

$$V_p = 44,77 \text{ m/s}$$

Tal: 0,247; 0,259; 0,209; 0,140 m/min

- **Ardósia**

A variação da energia específica com a profundidade de corte para cada rotação utilizada está ilustrada nas Figuras 5.23, 5.24 e 5.25.

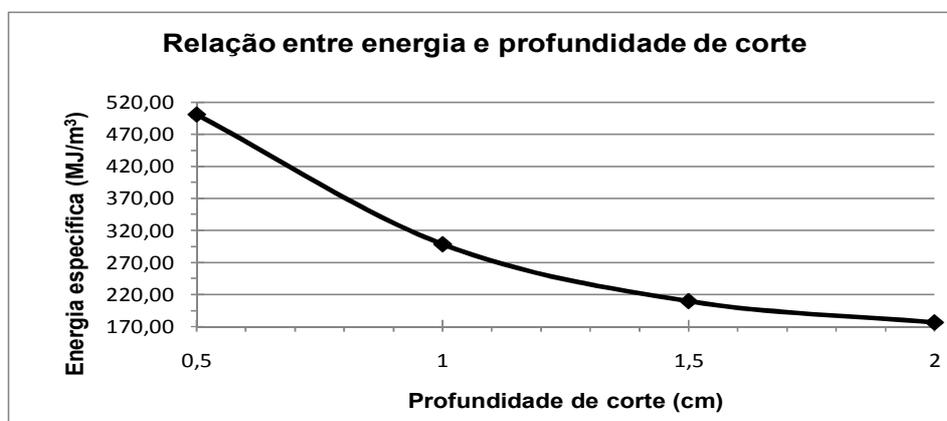


Figura 5.23: Variação da energia específica com a profundidade de corte para ardósia, utilizando-se velocidade periférica de 26,18m/s

$$V_p = 26,18 \text{ m/s}$$

Tal: 0,091; 0,089; 0,083; 0,074 m/min

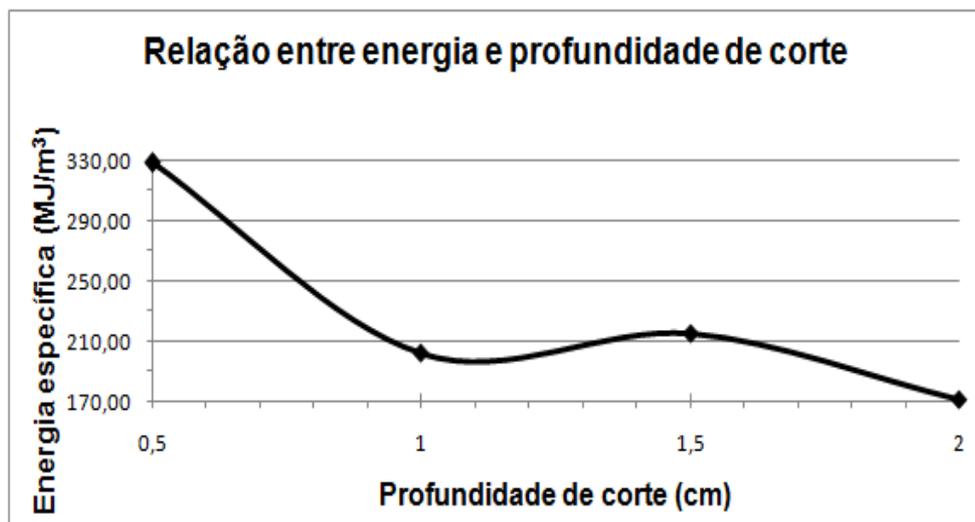


Figura 5.24: Variação da energia específica com a profundidade de corte para ardósia, utilizando-se velocidade periférica de 35,34m/s

$$V_p = 35,34 \text{ m/s}$$

Tal: 0,194; 0,155; 0,121; 0,103 m/min

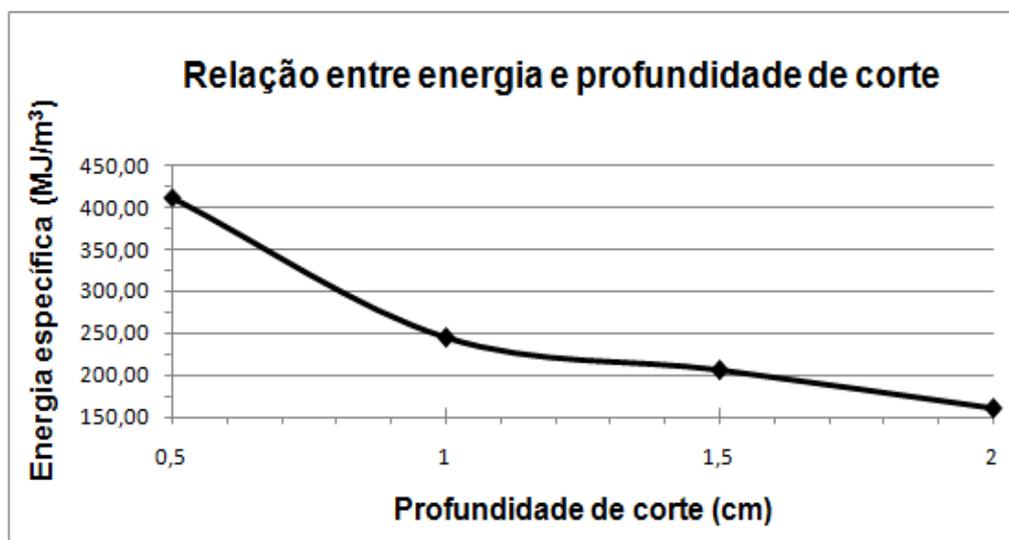


Figura 5.25: Variação da energia específica com a profundidade de corte para ardósia, utilizando-se velocidade periférica de 44,77m/s

$$V_p = 44,77 \text{ m/s}$$

Tal: 0,209; 0,195; 0,168; 0,147 m/min

Para os três tipos de rocha, ao se aumentar a profundidade de corte, o consumo de energia diminui, para as três velocidades periféricas utilizadas. Ao se ligar o motor, sem cortar, já se gasta energia, portanto, como a energia calculada é específica, aumentando-se a profundidade de corte, essa mesma energia está sendo aproveitada para se cortar um maior volume de rocha.

Provavelmente, essa relação entre energia específica e profundidade de corte deve ter um limite, pois para uma grande profundidade de corte, o motor é muito solicitado, pode gastar mais energia, desgastar mais e não cortar eficientemente.

Deve-se levar em conta que a variação na profundidade de corte serve para efeitos de estudo, na prática, as profundidades de corte são definidas e não podem ser variadas em função de desgaste e gasto de energia.

5.6.1.2 - Taxa de alimentação

H_c nos gráficos refere-se à profundidade de corte.

- **Quartzito**

As Figuras 5.26 e 5.27 ilustram a variação da energia específica com a taxa de alimentação para as profundidades de 1,0 e 1,5 cm, respectivamente e velocidade periférica de 26,18m/s.

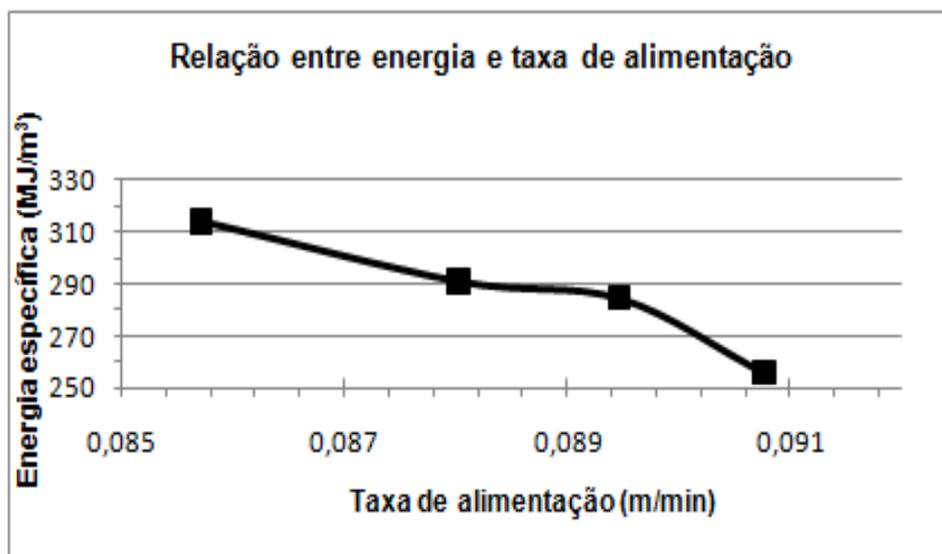


Figura 5.26: Relação entre energia e taxa de alimentação para o quartzito – Profundidade de 1,0cm e velocidade periférica de 26,18m/s

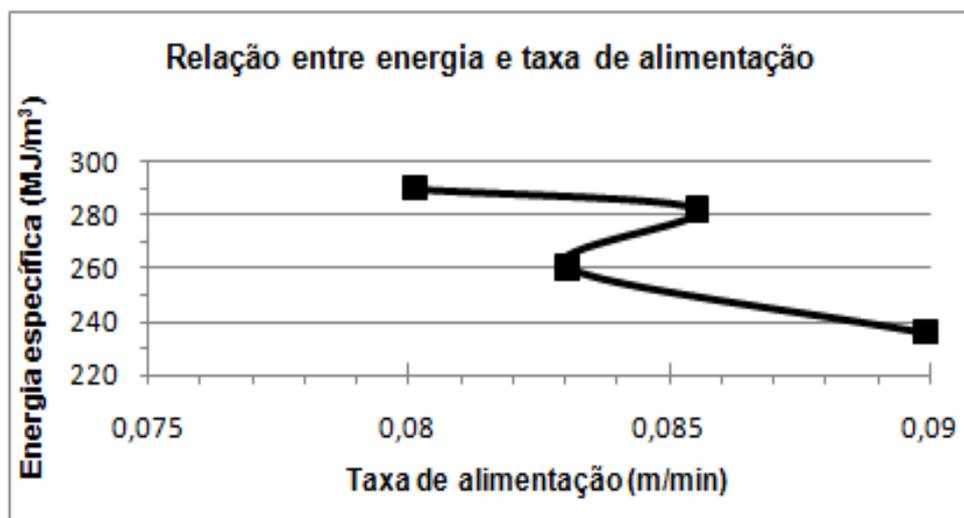


Figura 5.27: Relação entre energia e taxa de alimentação para o quartzito – Profundidade de 1,5cm e velocidade periférica de 26,18m/s

- **Granito**

As Figuras 5.28 e 5.29 ilustram a variação da energia específica com a taxa de alimentação para as profundidades de 1,0 e 1,5 cm, respectivamente e velocidade periférica de 26,18m/s.

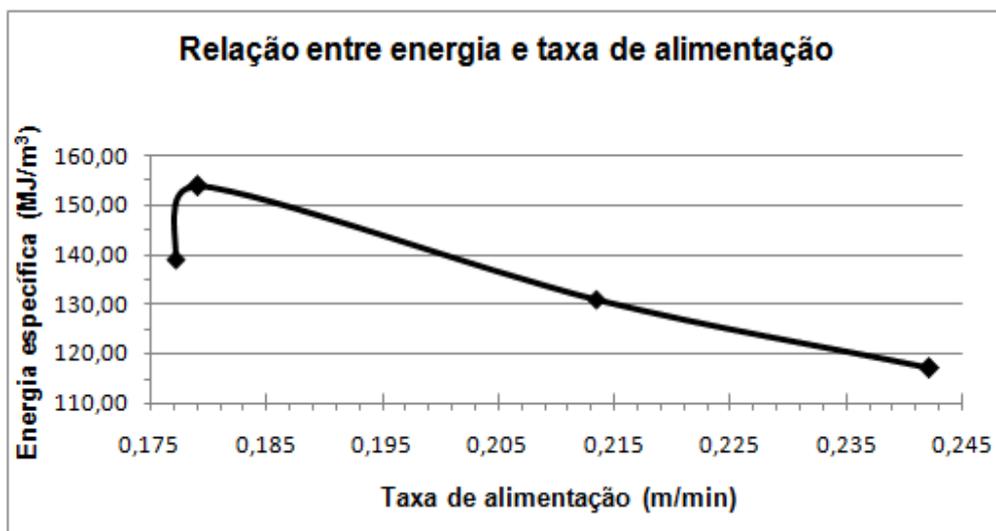


Figura 5.28: Relação entre energia e taxa de alimentação para o granito – Profundidade de 1,0cm e velocidade periférica de 26,18m/s

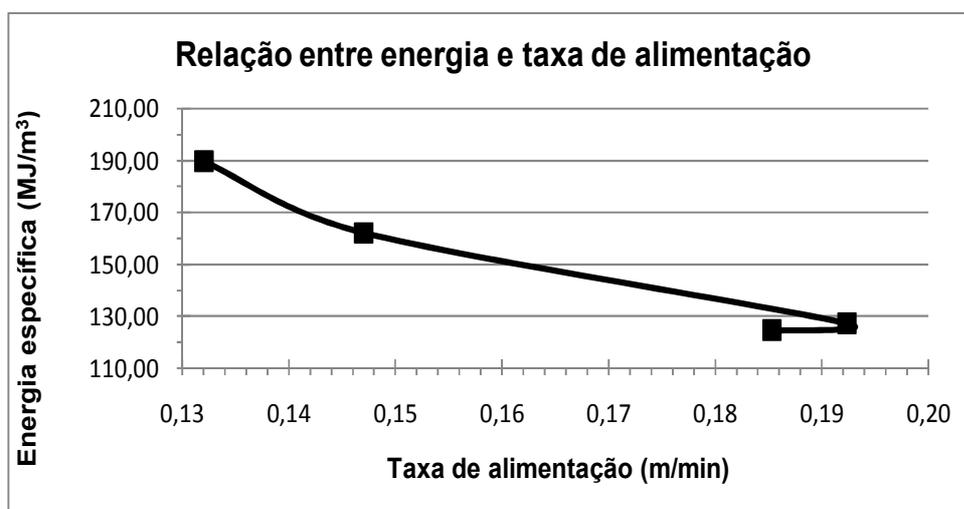


Figura 5.29: Relação entre energia e taxa de alimentação para o granito – Profundidade de 1,5cm e velocidade periférica de 26,18m/s

- **Ardósia**

As Figuras 5.30 e 5.31 ilustram a variação da energia específica com a taxa de alimentação para as profundidades de 1,0 e 1,5cm, respectivamente e velocidade periférica de 26,18m/s.

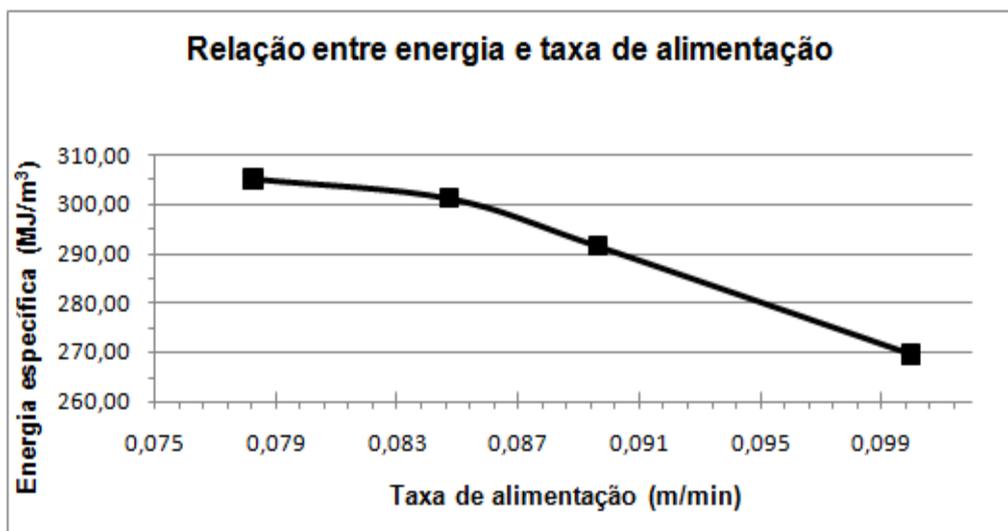


Figura 5.30: Relação entre energia e taxa de alimentação para a ardósia – Profundidade de 1,0cm e velocidade periférica de 26,18m/s

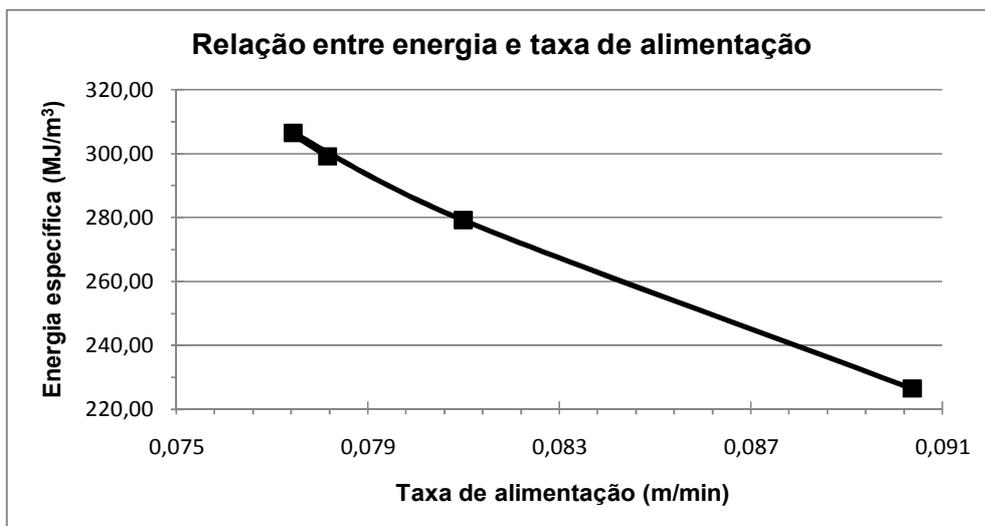


Figura 5.31: Relação entre energia e taxa de alimentação para a ardósia – Profundidade de 1,5cm e velocidade periférica de 26,18m/s

Como já citado, a taxa de alimentação, ou seja, velocidade de corte, não foi controlada, apenas procurou-se manter uma velocidade aproximadamente constante ao puxar a rocha, portanto a taxa de alimentação variou. Verifica-se que na maioria dos pontos, a energia específica consumida diminui com o aumento da taxa de alimentação, se não houvesse um limite, essa relação seria perfeita para os testes, para cortar rápido e consumir menos energia, seria só aumentar a taxa de

alimentação. Porém, ao aumentar excessivamente essa taxa, o consumo de energia pode aumentar e o motor pode parar.

5.6.1.3 - Taxa de remoção específica

- Quartzito

As Figuras 5.32, 5.33 e 5.34 ilustram a variação da energia específica com a taxa de remoção específica.

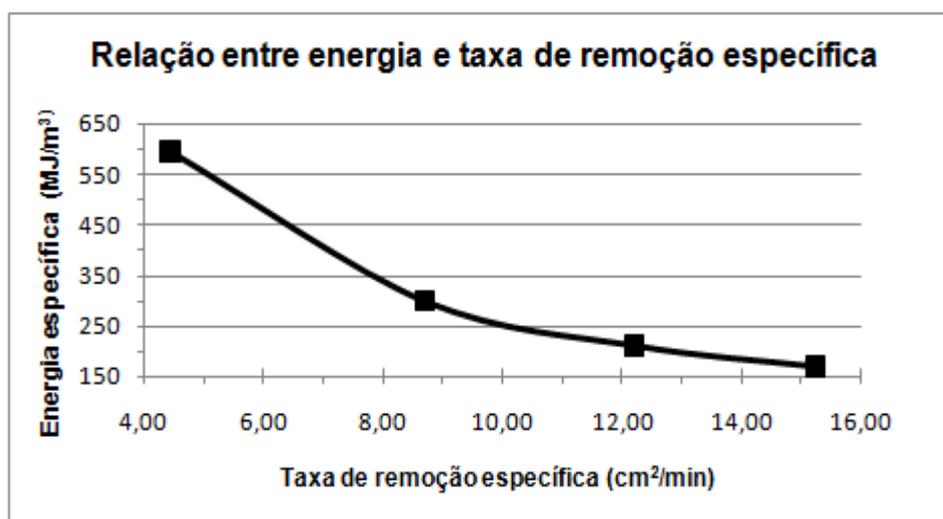


Figura 5.32: Relação entre energia específica e taxa de remoção específica para o quartzito, utilizando-se velocidade periférica de 26,18m/s

Hc: 0,5; 1; 1,5; 2 cm

Tal: 0,089; 0,087; 0,081; 0,076 m/min

Vp: 26,18m/s

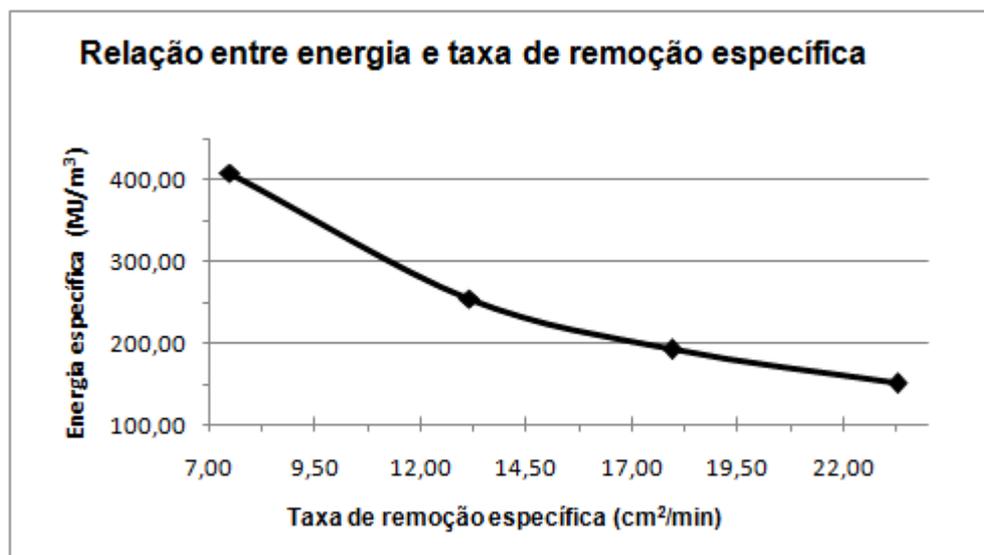


Figura 5.33: Relação entre energia específica e taxa de remoção específica para o quartzito, utilizando-se velocidade periférica de 35,34m/s

Hc: 0,5; 1; 1,5; 2 cm

Tal: 0,150; 0,132; 0,120; 0,116 m/min

Vp: 35,34m/s

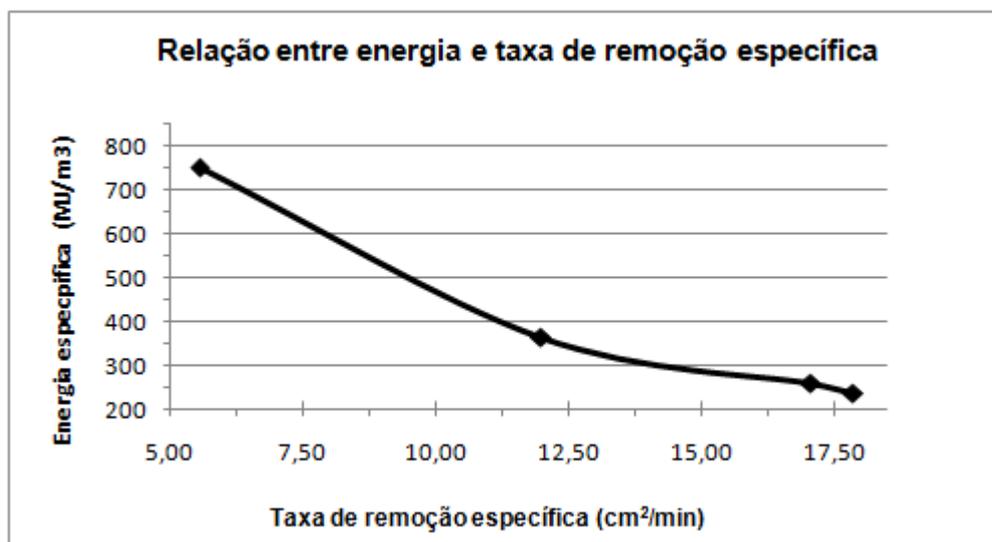


Figura 5.34: Relação entre energia específica e taxa de remoção específica para o quartzito, utilizando-se velocidade periférica de 44,77m/s

Hc: 0,5; 1; 1,5; 2 cm

Tal: 0,111; 0,120; 0,114; 0,089 m/min

Vp: 44,77m/s

- **Granito**

As Figuras 5.35, 5.36 e 5.37 ilustram a variação da energia específica com a taxa de remoção específica.

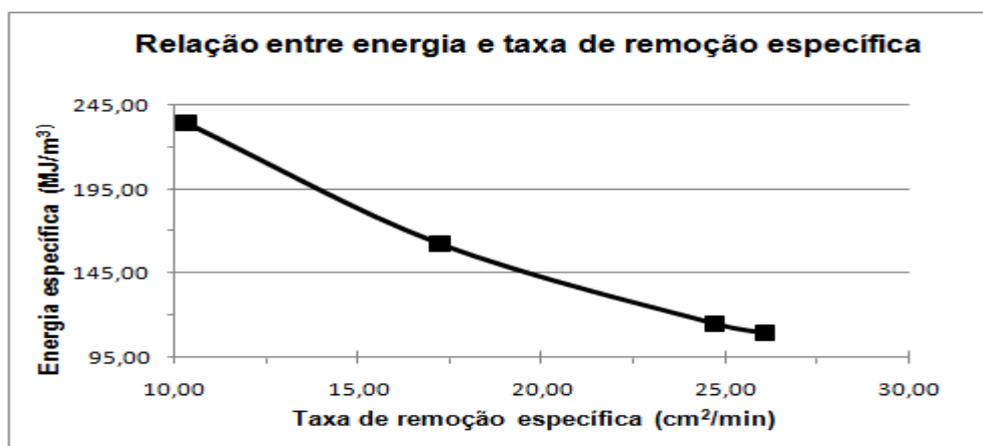


Figura 5.35: Relação entre energia específica e taxa de remoção específica para o granito, utilizando-se velocidade periférica de 26,18m/s

Hc: 0,5; 1; 1,5; 2 cm

Tal: 0,091; 0,089; 0,083; 0,074 m/min

Vp: 26,18m/s

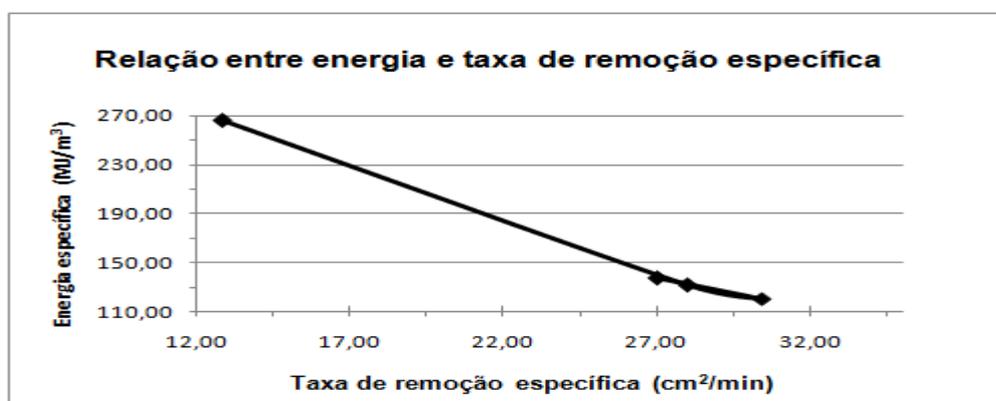


Figura 5.36: Relação entre energia específica e taxa de remoção específica para o granito, utilizando-se velocidade periférica de 35,34m/s

Hc: 0,5; 1; 1,5; 2 cm

Tal: 0,194; 0,155; 0,121; 0,103 m/min

Vp: 35,34m/s

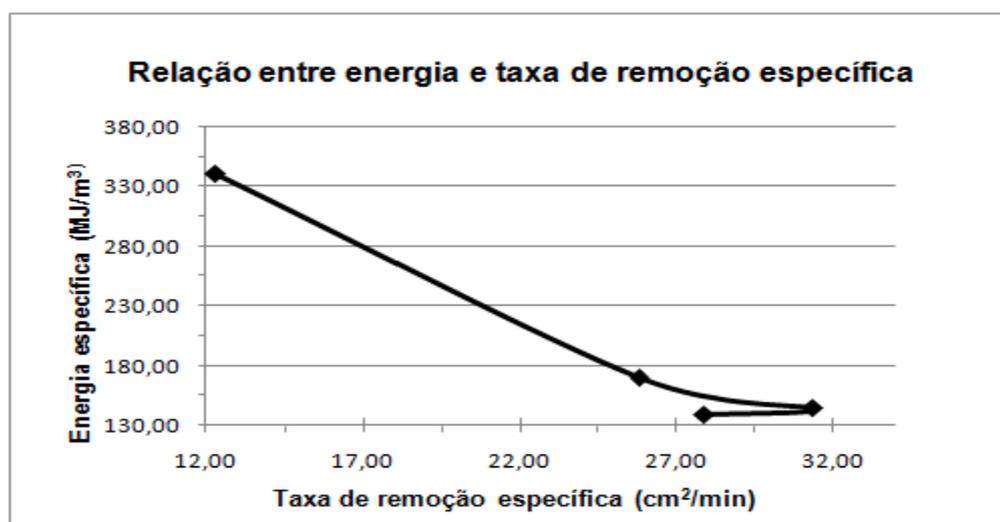


Figura 5.37: Relação entre energia específica e taxa de remoção específica para o granito, utilizando-se velocidade periférica de 44,77m/s

Hc: 0,5; 1; 1,5; 2 cm

Tal: 0,209; 0,195; 0,168; 0,147 m/min

Vp: 44,77m/s

- **Ardósia**

As Figuras 5.38, 5.39 e 5.40 ilustram a variação da energia específica com a taxa de remoção específica.

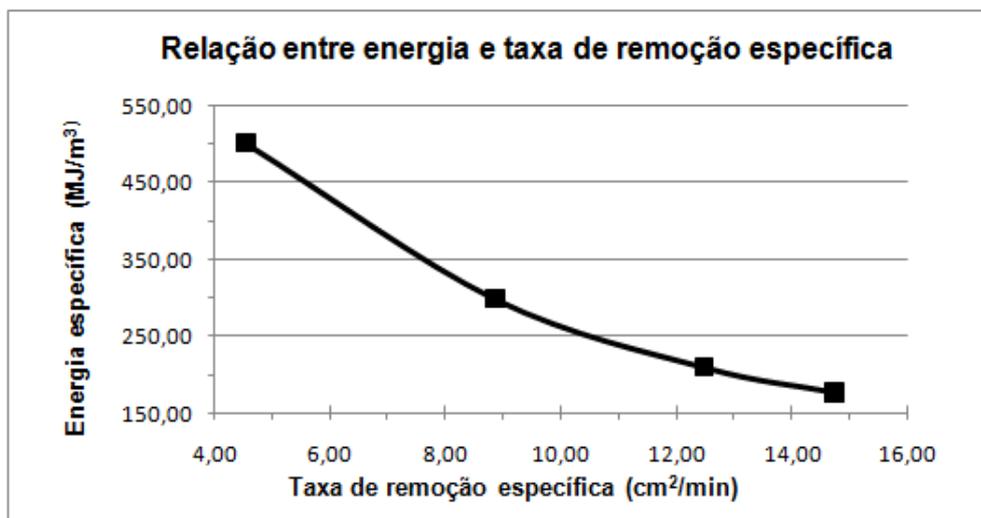


Figura 5.38: Relação entre energia específica e taxa de remoção específica para a ardósia, utilizando-se velocidade periférica de 26,18m/s

Hc: 0,5; 1; 1,5; 2 cm

Tal: 0,091; 0,089; 0,083; 0,074 m/min

Vp: 26,18m/s

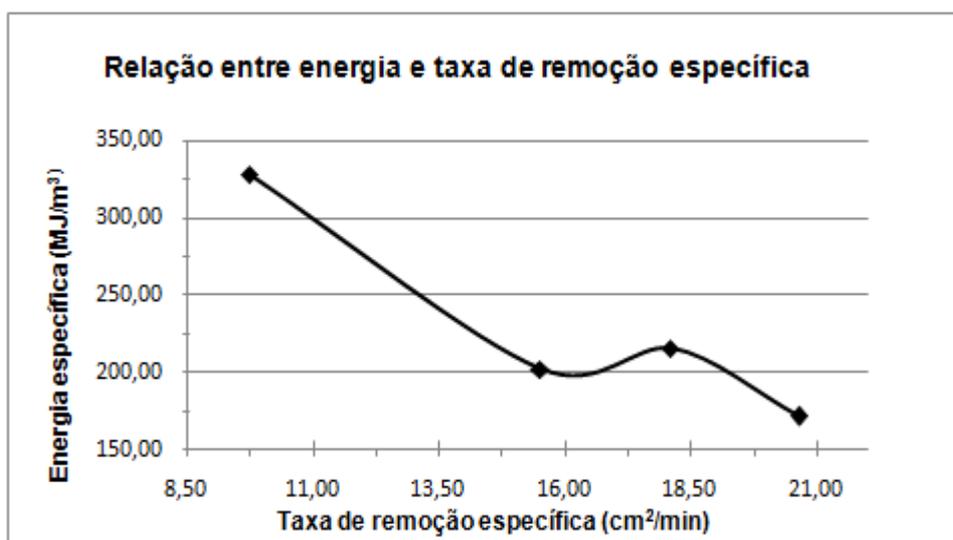


Figura 5.39: Relação entre energia específica e taxa de remoção específica para a ardósia, utilizando-se velocidade periférica de 35,34m/s

Hc: 0,5; 1; 1,5; 2 cm

Tal: 0,194; 0,155; 0,121; 0,103 m/min

Vp: 35,34m/s

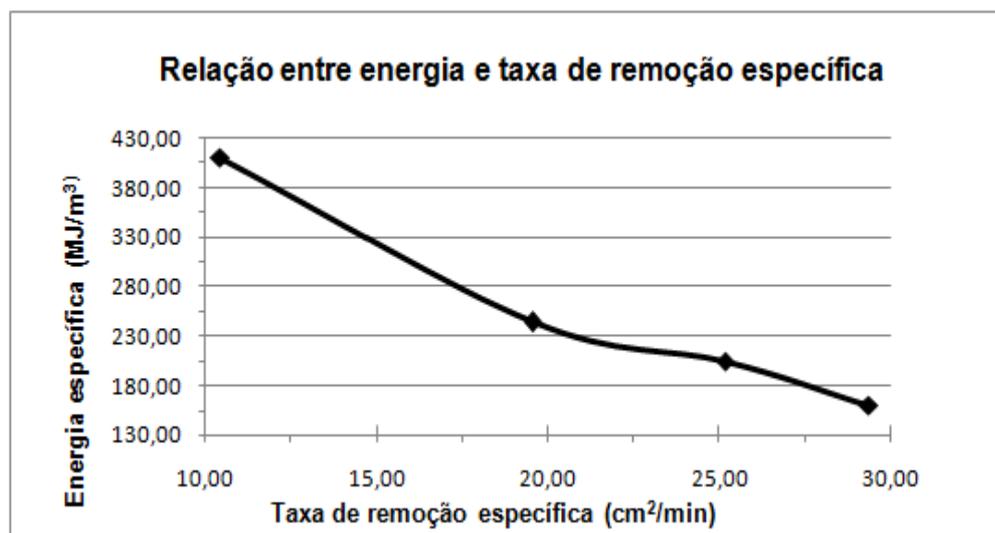


Figura 5.40: Relação entre energia específica e taxa de remoção específica para a ardósia, utilizando-se velocidade periférica de 44,77m/s

Hc: 0,5; 1; 1,5; 2 cm

Tal: 0,209; 0,195; 0,168; 0,147 m/min

Vp: 44,77m/s

Como já citado, taxa de remoção específica ou taxa de corte é a quantidade de material serrado por unidade de tempo ou a área cortada por unidade de tempo, observa-se pelos gráficos (com exceção de alguns pontos) que quanto maior a taxa de remoção específica, menor é a energia gasta. Essa relação, assim como a relação entre energia específica e profundidade de corte e entre taxa de alimentação, são ótimas para o teste, gasta-se menor tempo para cortar, se corta maior quantidade de material e gasta-se menor energia, porém, deve-se considerar que se está trabalhando abaixo do limite do motor, ao aumentar muito a taxa de remoção específica, o motor pode não trabalhar eficientemente e até parar.

5.6.2- Velocidade periférica

5.6.2.1 - Força tangencial

- **Quartzito**

A Figura 5.41 ilustra a variação da força tangencial com a velocidade periférica para cada profundidade de corte.

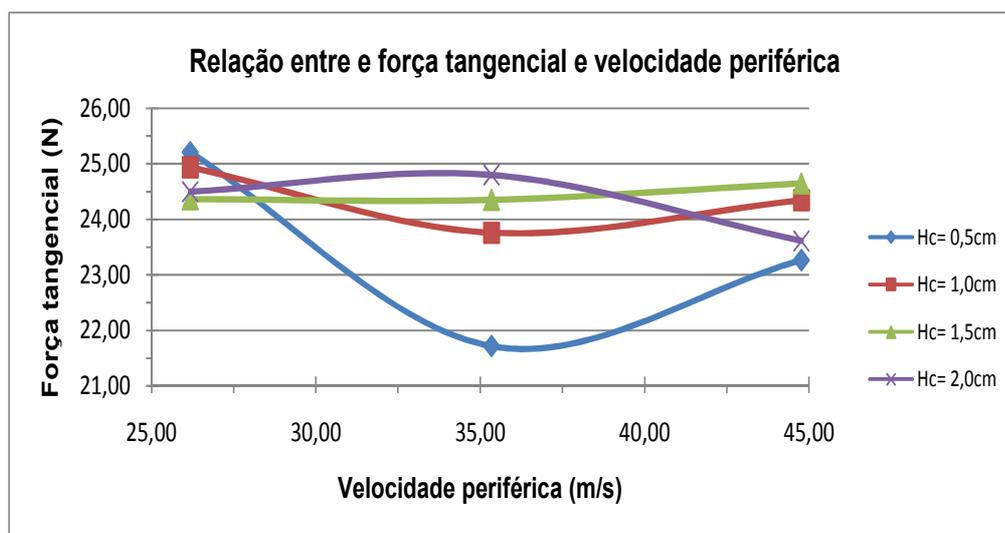


Figura 5.41: Relação entre força tangencial e velocidade periférica com todas as profundidades estudadas para o quartzito

Taxa de alimentação para cada profundidade de corte:

- 0,5 cm: 0,089; 0,150; 0,111 m/min
- 1,0 cm: 0,087; 0,132; 0,120 m/min
- 1,5 cm: 0,081; 0,120; 0,114 m/min
- 2,0 cm: 0,076; 0,116; 0,089 m/min

- **Granito**

A Figura 5.42, ilustra a variação da força tangencial com a velocidade periférica para cada profundidade de corte.

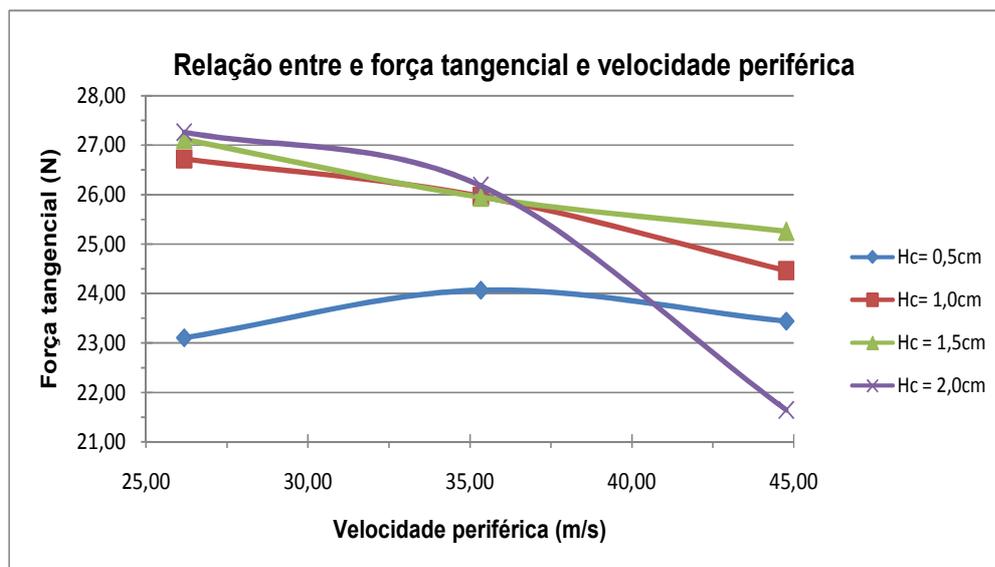


Figura 5.42: Relação entre força tangencial e velocidade periférica com todas as profundidades estudadas para o granito

Taxa de alimentação para cada profundidade de corte:

- 0,5 cm: 0,207; 0,256; 0,247 m/min
- 1,0 cm: 0,172; 0,280; 0,259 m/min
- 1,5 cm: 0,165; 0,203; 0,209 m/min
- 2,0 cm: 0,131; 0,135; 0,140 m/min

- **Ardósia**

A Figura 5.43, ilustra a variação da força tangencial com a velocidade periférica para cada profundidade de corte.

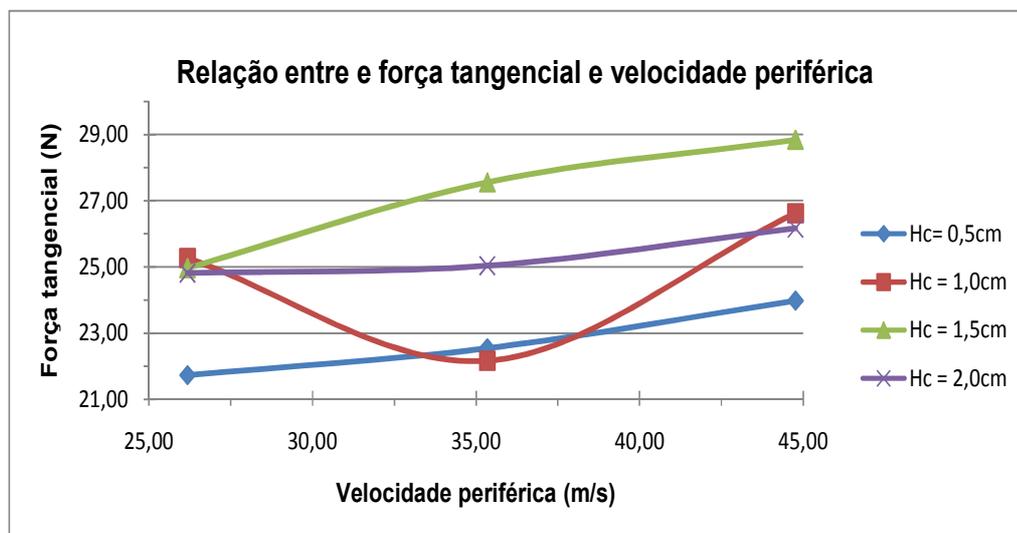


Figura 5.43: Relação entre força tangencial e velocidade periférica com todas as profundidades estudadas para a ardósia

Taxa de alimentação para cada profundidade de corte:

- 0,5 cm: 0,091; 0,194; 0,209 m/min
- 1,0 cm: 0,089; 0,155; 0,195 m/min
- 1,5 cm: 0,083; 0,121; 0,168 m/min
- 2,0 cm: 0,074; 0,103; 0,247 m/min

Esperava-se que a força tangencial diminuísse com o aumento da velocidade periférica, pois, ao se aumentar a velocidade de rotação do disco, a resistência da rocha ao corte é menor. Considerando os testes realizados com os três tipos de rocha, em aproximadamente 33% deles, isso aconteceu e em 25%, diminuiu, mas depois aumentou.

5.6.2.2- Energia específica

As taxas de alimentação dos testes das Figuras 5.44, 5.45 e 5.46, são as mesmas dos testes das Figuras 5.41, 5.42 e 5.43.

- **Quartzito**

A Figura 5.44, ilustra a variação da energia específica com a velocidade periférica para cada profundidade de corte.

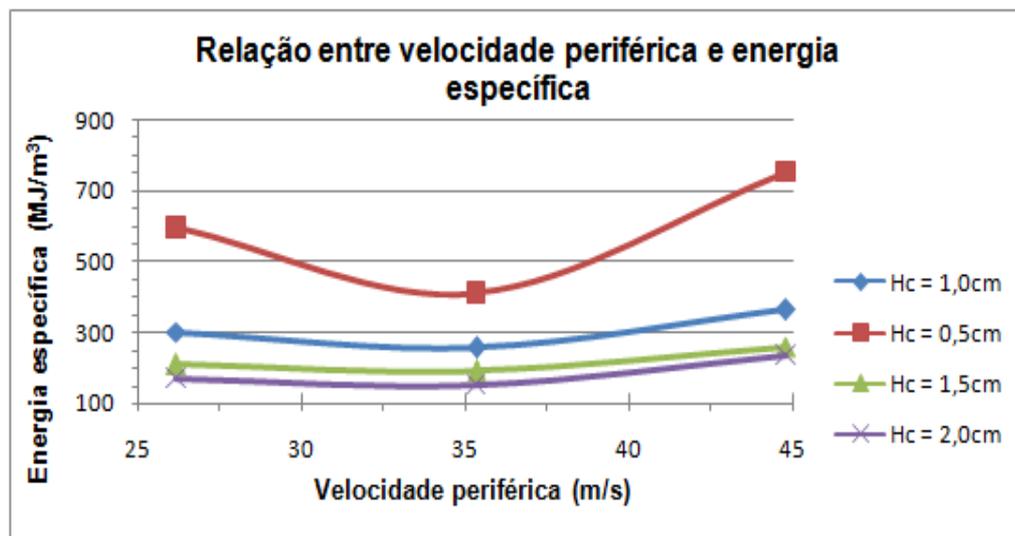


Figura 5.44: Relação entre velocidade periférica e energia específica com todas as profundidades de corte estudadas para o quartzito

- **Granito**

A Figura 5.45, ilustra a variação da energia específica com a velocidade periférica para cada profundidade de corte.

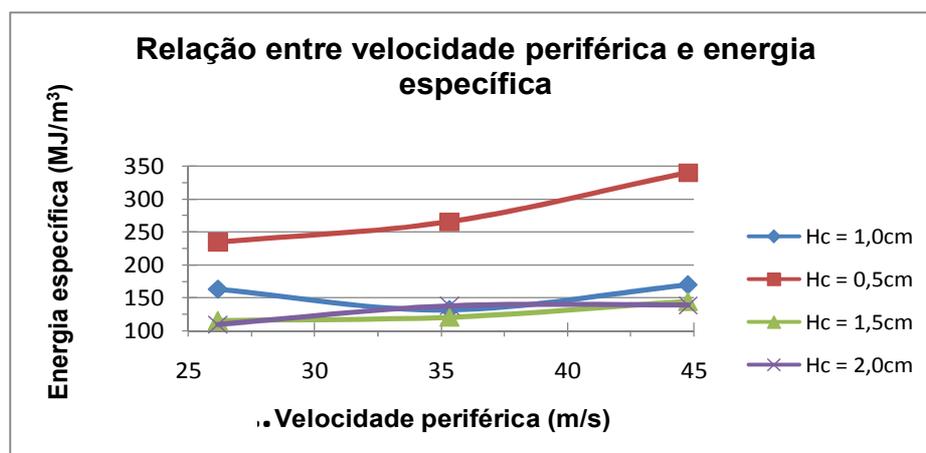


Figura 5.45: Relação entre velocidade periférica e energia específica com todas as profundidades de corte estudadas para o granito

- **Ardósia**

A Figura 5.46, ilustra a variação da energia específica com a velocidade periférica para cada profundidade de corte.

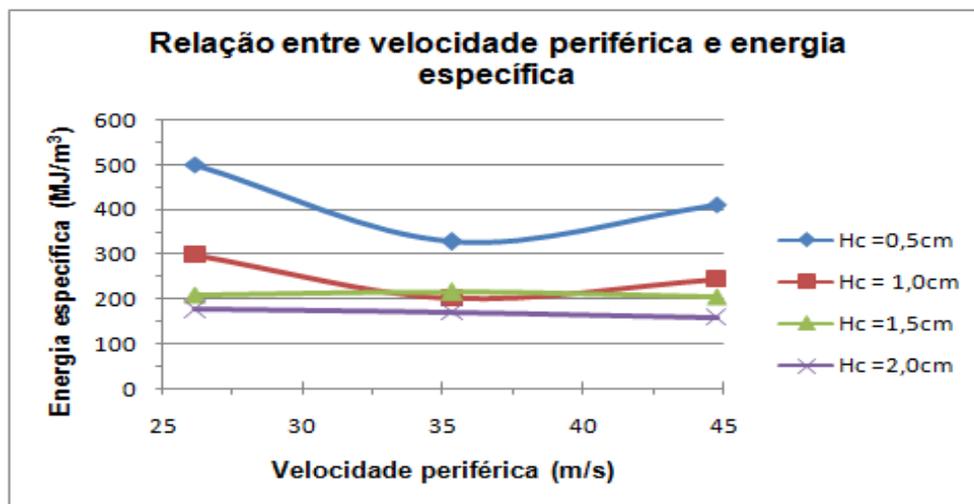


Figura 5.46: Relação entre velocidade periférica e energia específica com todas as profundidades de corte estudadas para a ardósia

Ao aumentar a velocidade periférica, percebe-se uma tendência, na maioria dos testes, em diminuir o gasto de energia para a velocidade de 35,34m/s e aumentar para 44,77m/s. Somente com esses testes, conclui-se que a velocidade periférica ideal, considerando o gasto de energia, seria de aproximadamente 35,34m/s, mas seria necessário uma taxa de alimentação constante para verificar essa relação e a realização de mais testes, pois, provavelmente, a melhor velocidade periférica para o corte é a maior.

Comparação entre os resultados dos testes de corte entre granito, quartzito e ardósia

Comparando-se os testes de corte com os três tipos de rocha a uma mesma profundidade de corte, verifica-se que em 75% dos testes de corte realizados, conforme Tabelas V.11, V.13, V.15, a energia específica consumida decresce do quartzito, para ardósia e granito. A Figura 5.47, ilustra graficamente essa relação para o corte realizado com velocidade periférica de 26,18m/s e profundidade de 0,50 cm.

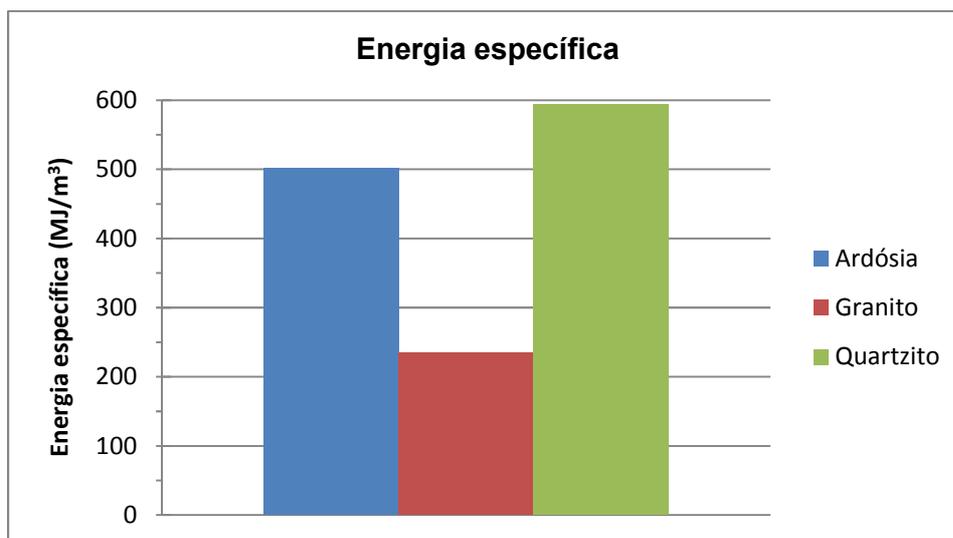


Figura 5.47: Comparação do consumo de energia dos testes de corte para granito, quartzito e ardósia a profundidade de 0,5cm e velocidade periférica de 26,18m/s

Comparando-se o granito com o quartzito, verifica-se que em 100% dos testes realizados, a energia gasta foi menor para o corte de granito. A mesma relação é observada quando se compara o granito com a ardósia, em 100% dos testes, a energia gasta foi menor para o corte do granito.

Esperava-se que a energia gasta para o corte de quartzito fosse bem maior em relação à energia gasta para o corte da ardósia, devido à maior dureza do quartzito, conforme se pode verificar no teste de desgaste por abrasão Amsler, verificou-se que em apenas 75% dos casos, essa relação foi obedecida, como já citado, há outros parâmetros que influenciam no corte que devem ser considerados, como tamanho dos grãos, matriz, composição mineralógica, além também, das condições de operação e habilidade do operador.

Capítulo 6 – Conclusões

- No corte de rochas ornamentais utilizando-se disco diamantado, não se pode considerar isoladamente as variáveis envolvidas no corte como também, as propriedades das rochas cortadas. Nem sempre, no corte das rochas em que se gastou um tempo menor, gastou-se menos energia.
- Os índices físicos não influenciaram muito no resultado dos testes, ao se comparar os índices físicos de um tipo de rocha com outra, previamente, algumas conclusões poderiam ser tiradas sobre o resultado dos testes, como nível de facilidade para o corte, gasto de tempo, consumo de energia, mas, nem sempre, os resultados atenderam às expectativas. Isso se deve ao fato de que se utilizou um tipo apropriado de disco para cada rocha, já fabricado levando-se em consideração as propriedades dela. Realizando-se cortes em um mesmo tipo de rocha, de diferentes depósitos, os índices físicos poderiam ser melhor comparados e os resultados dos testes de corte seriam de acordo com eles.
- Existe uma velocidade periférica máxima recomendada pelo fabricante do disco, nem sempre, usar essa velocidade máxima, indica menores gastos de tempo e energia e menor desgaste do disco, outros valores de velocidade periférica devem ser experimentados até se chegar a um valor ideal para um corte eficiente.
- Os valores de resistência à compressão uniaxial são mais relevantes para os testes de corte quando se compara rochas silicáticas, as que possuem maior valor de resistência, são mais difíceis de cortar.
- O valor de resistência à flexão não tem uma relação direta com o corte, rochas com valor de resistência à flexão mais altos, podem ser mais fáceis ou mais difíceis de cortar do que as que possuem valor mais baixo. Esse valor depende da coesão dos grãos dos minerais presentes.

- Nas relações entre as variáveis que apresentam uma certa linearidade como taxa de alimentação e consumo de energia, quanto maior a taxa, menor o gasto de energia, deve-se considerar que existe um limite. Essa relação é ótima, mas não é infinita, existe o risco de danificar o motor, o ponto máximo deve ser encontrado para que a máquina não seja prejudicada.
- O valor do desgaste Amsler influencia no corte, ao se comparar rochas silicosas com as que não contêm sílica, ou têm pouca quantidade. Nessa comparação, rochas que se desgastam mais facilmente, são mais fáceis de cortar.
- O consumo de energia e o desgaste do disco são fatores relevantes para a otimização do corte. Chegar a um ponto ótimo entre as variáveis envolvidas no corte, considerando também as propriedades da rocha e gastando-se menor energia, ainda não se chegou a um corte eficiente, é necessário considerar também o desgaste do disco. Porém, em escala laboratorial, não há como medir o desgaste do disco, pois ele é mínimo. O desgaste deve ser medido industrialmente, pois o disco só desgasta após realizar muitos cortes.
- Para efeitos de estudo, a taxa de alimentação (velocidade de corte) deveria ser constante em alguns testes, para se comparar com as outras variáveis. Porém, industrialmente, não é vantagem manter a taxa de alimentação constante, pois algumas regiões de uma mesma rocha podem ser mais duras, conter grãos maiores e oferecerem maior resistência ao corte. Se a velocidade nesse local for a mesma que em locais mais fáceis de cortar, o disco será forçado e pode desgastar mais rápido.
- Com esse trabalho foi possível verificar o comportamento das rochas no corte, observar o comportamento das variáveis envolvidas, calcular o consumo de energia, relacionar os parâmetros envolvidos no corte com a composição das rochas e algumas propriedades delas, comparar esses resultados de uma rocha com a outra e verificar a tendência de comportamento no corte. Porém, para se chegar a conclusões absolutas e a valores exatos, é necessário realizar testes em

escala industrial, fixando-se cada variável e fazendo-se vários testes variando-se as outras, com essas combinações, é possível chegar a pontos ótimos e comprovar a tendência das relações aqui apresentadas. Além de relacionar também com o desgaste do disco, pois não adianta consumir pouca energia, cortar rápido, se a vida útil do disco for minimizada.

- É necessário que as indústrias considerem todos os parâmetros envolvidos no corte, as propriedades das rochas, a habilidade do operador, o disco, a máquina, pois, realizar o processo de beneficiamento rapidamente, consumindo-se pouca energia pode não indicar a melhor situação. O disco pode ser desgastado rapidamente e o motor pode ser muito solicitado. Portanto, deve-se considerar a influência de todas essas variáveis no planejamento das operações de corte de modo a otimizar o processo.

Capítulo 7 – Relevância dos resultados

Os resultados obtidos indicam que no beneficiamento de rochas ornamentais, em especial no corte com disco diamantado, é necessário considerar todos os parâmetros envolvidos no corte e também as propriedades das rochas.

São vários os impactos positivos nessa consideração como prolongamento da vida útil da máquina, maior lucro a longo prazo, menor geração de rejeitos, menor consumo de energia, melhor qualidade do produto final.

Os resultados desse trabalho podem ser aplicados pelas indústrias de beneficiamento de rochas ornamentais para otimizarem a etapa de corte de placas.

Capítulo 8 - Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar testes de corte utilizando disco diamantado com um mesmo tipo de rocha proveniente de depósitos diferentes para verificar a influência da composição e índices físicos no corte.
- Realizar testes mantendo a taxa de alimentação (velocidade de corte) constante, variando-se os outros parâmetros.
- Verificar a continuação da tendência entre algumas relações aqui apresentadas: como consumo de energia com profundidade de corte, taxa de alimentação, taxa de remoção específica, velocidade periférica e velocidade periférica e força tangencial, fazendo-se um maior número de testes.
- Fazer testes de compressão uniaxial com o granito e ardósia e resistência à flexão também com o granito.
- Realizar testes de corte em escala industrial realizando-se um maior número de testes avaliando-se o desgaste do disco para que esse fator também seja comparado com as outras variáveis.
- Através de um maior número de testes e da consideração da vida útil da máquina, chegar a um ponto ótimo entre as variáveis para cada tipo de rocha aqui estudadas e/ou outros tipos de rochas.

Capítulo 9 – Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. MB 3379. Materiais Inorgânicos – Determinação do desgaste por abrasão. Rio de Janeiro, 1990, 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12763. Rochas para revestimento – Determinação da resistência à flexão. Rio de Janeiro, 1992, 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12768: Rochas para revestimentos- Análise petrográfica. Rio de Janeiro, 1992, 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12767: Rochas para revestimento – Determinação da resistência à compressão uniaxial. Rio de Janeiro, 1992, 2p.

BUYUKSAGIS, I. S. (2007). Effect of cutting mode on the sawability of granites using segmented circular diamond sawblade. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 183, p.399 – 406.

COIMBRA FILHO, C. G. (2006). Relação entre processo de corte e qualidade de superfícies serradas de granitos ornamentais. Dissertação de mestrado (Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Geotecnia). Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. 168p.

CHIODI FILHO, C. Aspéctos técnicos e econômicos do setor de rochas ornamentais. (Série estudos e documentos – 28).CNPq/CETEM, 1995, Rio de Janeiro. 75 p.

CITRAN, L. G. (2000). La segagione de graniti. Verone: Editora: Giorgio Zusi, 127p.

COSTA, A. G.; CAMPELLO, M. S.; PIMENTA, V. B. (2001) Rochas ornamentais e de revestimento de Minas Gerais: Principais Ocorrências, caracterização e aplicações na indústria da construção civil. *Geonomos*, v. 8 (1), p. 9 - 13.

Da MATTA, P. M. (2003). Indústria de rochas ornamentais: Rejeitos x Produção limpa. Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM/BA. Salvador/BA, 45p.

da MATTA, P. M.; VÉRAS, A. M.; CORREIA, D. M. B. (2007). Roteiro básico para pesquisa de rocha ornamental: Modelo aceito pelo 7º DS/DNPM. Trabalho apresentado no Congresso Brasileiro de Geologia em Aracaju/SE (2006) e no III Congresso Brasileiro de Geologia e Rochas Ornamentais – Natal/ RN (2007), 24p.

DESCHAMPS, E. ; JÚNIOR, B. M.; COSTA, C. S.; SANTOS, M. G. V.; KELLER, W. S.; CARVALHO FILHO, C. A.; DAMASCENO, M. A.P.; PINTO, C. L. L. (2002). Controle Ambiental na Mineração de Quartzito – Pedra São Tomé. Projeto Minas Ambiente. Segrac Editora e Gráfica Limitada. Belo Horizonte, 204 p.

ERSOY, A., ATICI, U. (2004) Performance Characteristics of circular diamond saws in cutting of different types of rocks. *Diamond and related materials*, v. 13, p. 22 – 37.

ERSOY, A., BUYUKSAGIS, S., ATICI, U. (2005). Wear characteristics of circular diamond saws in the cutting of different hard abrasive rocks. *Wear*, v. 258, p. 1422 – 1436.

FRAZÃO, E. B.; FARJALLAT, J.E.S. Seleção de pedras para revestimento e propriedades requeridas. *Revista Rochas de Qualidade*, Nº 24, 1995.

GOSHTASBY, K.; M. AHAMADI; J. SEYEDI. (2006). Anisotropic Strenght behavior of slates in the Sirjan- Sanandaj zone. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, V.106., p. 71 -76.

KONSTANTY, J. (2002). Theoretical analysis of stone sawing with diamonds. *Journal of Materials Processing Technology*. V. 123, p. 146 – 154.

LUO, S.Y. (1997). Investigation of the worn surfaces of diamond sawblades in sawing granite. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 70, p. 1 – 8.

LUO, S. Y.; LIAO, Y. S. (1995). Study of behaviour of diamond sawblades in stone processing. *Journal of Materials Processing Technology*. v. 51, p. 296 – 308.

NEVES, A. P. F. (1997). A serrabilidade das rochas ornamentais. VI Congresso Nacional de Geotecnia, SPG, Lisboa.

REGADAS, I. C. M. C. (2006). Aspéctos relacionados às lavras de granitos ornamentais com fio diamantado no norte do estado do Espírito Santo, Brasil. Dissertação de mestrado (Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Geotecnia). Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. 130 p.

REIS, R. C.; SOUZA, W. T. Métodos de lavra de rochas ornamentais. (2003). REM – Revista Escola de Minas, v. 56 (3), p. 207 – 209.

RIBEIRO, R. P. Influência das características petrográficas de granitos no processo industrial de desdobramento de blocos. (2005). Tese de doutorado (Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Geotecnia). Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. 120 p.

ROBLEDA, A. S., VILÁN, J. A., LAGO, M. L., CASTRO, J. T. (2010) The rock processing sector: Part I: Cutting Technology Tools, a new diamond segment band saw Part II: Study of cutting forces. Medellín. Dyna, ano 77, n. 161, p. 77 – 87.

RODRÍGUEZ-REY, A.; SUAREZ DEL RIO, L. M.; CALLEJA, L.; RUIZ, A. V. G. (1998). El corte de rocas ornamentales con discos diamantados: influencia de las características petrográficas de La roca. *Materiales de Construcción*, Vol. 48, nº 251, p. 49 – 55.

SELONEN, O.; LUODES, H.; EHLERS, C. (2000). Exploration for dimensional stone – Implications and examples from the Precambrian of southern Finland. *Engineering Geology* nº 56, p. 275 – 291.

SPÍNOLA, S. V. P. A. C. (1998). Influência da qualidade da serragem de granitos no consumo energético do desbaste. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 138p.

SUÁREZ DEL RIO, L. M., RODRÍGUEZ-REY, A.; CALLEJA, L.; RUIZ, A. V. G. (1998). El corte de rocas ornamentales con discos diamantados: Influencia de los factores propios Del sistema de corte. *Materiales de Construcción*, Vol. 48, nº 250, p. 53 – 59.

STELLIN JUNIOR, A. ; VIDAL, F. W. H. (2001). Estudo do elemento abrasivo do fio diamantado nos granitos do Estado do Ceará. Rochas de Qualidade, São Paulo, v. 33, n. 160, p. 128-143.

SWAIN, M. V.; LAWN, B. R. (1976). Indentation fracture in brittle rocks and glasses. International Journal of Rocks Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Vol. 13, p. 311 – 319.

TORQUATO, J. R.; BESSA, M. F.; ; MUNIZ H. F. (2002). Uso do Pundit na determinação de anomalias ultra-sônicas em blocos rochosos. III Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste. Cetem , V. 1,,Rio de Janeiro. p. 20 – 23.

TUGRUL, A.; ZARIF I. H. (1999). Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. Engineering Geology, Nº. 51, p. 303 – 317.

Conheça as rochas ornamentais. Disponível em: http://www.abirochas.com.br/rochas_ornamentais.php. Acessado em: 07 fev. 2011.

Minerals Zone – World Mineral Exchange. <http://www.mineralszone.com/stones/slate.html>. Acessado em: 15 fev. 2012

Museu de rochas e minerais. Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/museudpm/>. Acessado em: 25 fev. 2011.

DADOS BIOGRÁFICOS DO AUTOR

Karina Idemburgo nasceu em 17 de novembro de 1982, em Belo Horizonte. Filha de Jorge Idemburgo e Imaculada Conceição Idemburgo, casada com João Teixeira Nunes, com quem tem uma filha: Laís Teixeira Idemburgo. Graduiu-se em Engenharia de Minas pela UFMG, em julho de 2009. Em fevereiro de 2010, iniciou o mestrado nessa Universidade, no Departamento de Engenharia de Minas, onde também foi professora substituta no período de março a dezembro de 2011.