

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica,
Materiais e de Minas

Tese de Doutorado

Reciclagem de Resíduo Gerado na Extração
de Quartzito

Autor: Mário Luís Cabello Russo
Orientador: Prof. Antônio Eduardo Clark Peres

Novembro/2011

Mário Luís Cabello Russo

Reciclagem de Resíduo Gerado na Extração de Quartzito

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Minas.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral.

Orientador: Prof. Antônio Eduardo Clark Peres.

Belo Horizonte
Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
2011

R958r

Russo, Mário Luís Cabello.
Reciclagem de resíduo gerado na extração de quartzito [manuscrito] /
Mário Luís Cabello Russo. – 2011.
xvi, 172 f., enc. : il.

Orientador: Antônio Eduardo Clark Peres.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais,
Escola de Engenharia.

Bibliografia: f.160-172

1. Engenharia metalúrgica – Teses. 2. Engenharia de minas – Teses.
3. Tecnologia mineral – Teses. 4. Rochas ornamentais – Teses. 5.
Materiais de construção – Teses. I. Peres, Antônio Eduardo Clarck. II.
Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 622(043)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado Paz, Saúde e Harmonia nesta caminhada. Agradeço ainda a todos que contribuíram para a realização deste trabalho, em especial:

- Ao Prof. Antônio Eduardo Clark Peres pela orientação, amizade e paciência.
- Aos Professores George Valadão e José Ildfonso (DEMIN/UFMG), ao professor Luís Fernando Ríspoli (DECAT/UFOP) e à Dra. Maria Eugênia Monteiro de Castro e Silva, membros da banca avaliadora, pelas valiosas sugestões que contribuíram muito para este trabalho.
- Aos Professores Cláudio Lúcio Pinto e Luis Cláudio Montenegro (DEMIN/UFMG) pela ajuda durante o desenvolvimento do projeto.
- Aos colegas, professores do curso técnico em Edificações do IFMG - Campus Congonhas pelo apoio durante todas as etapas do doutorado. Em especial, ao prof. Rodolfo Gonçalves, que, com o laboratorista Silas César e os bolsistas de iniciação científica Rafael Lisboa e Driely Oliveira, ajudaram nos ensaios.
- Ao Prof. José Emanuel Gomes, ao Engenheiro Luciano Oliveira e ao Técnico Erverson Ferreira, da Fundação Gorceix pelo apoio nas etapas de caracterização.
- Ao Prof. César Mendonça (DEGEO/UFOP) pelas análises petrográficas e ao Prof. Gilberto Fernandes (DECIV/UFOP) pela disponibilização de laboratório para os ensaios Los Angeles e Treton.
- À Professora Daliana, pela revisão do texto.
- Aos colegas do CPGEM/UFMG, em especial a Denílson, Júnia e Otávia.
- Ao CPGEM/UFMG e aos professores, pela oportunidade de fazer o doutorado e pelos ensinamentos.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
2	OBJETIVO.....	20
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
3.1	Rochas Ornamentais.....	21
3.1.1	Pesquisa Geológica e Caracterização Tecnológica.....	27
3.1.2	Lavra.....	30
3.1.3	Técnicas de Corte.....	37
3.1.4	Beneficiamento.....	40
3.1.5	Sistemas de Disposição de Rejeitos.....	43
3.1.6	Reciclagem de Resíduos.....	47
3.1.6.1	Reciclagem de Resíduos de Rochas Ornamentais.....	47
3.1.6.2	Reciclagem de Resíduos de Quartzito.....	53
3.2	Quartzito como Rocha Ornamental.....	56
3.3	Extração de Quartzito em Minas Gerais.....	61
3.4	Agregado para a Construção Civil.....	70
3.4.1	Agregado Graúdo.....	74
3.4.2	Agregado Miúdo.....	82
3.4.3	Agregado para Argamassa.....	92
3.4.4	Agregado para Pré-Moldados.....	99
3.4.5	Agregados Empregados como Base para Pavimentação.....	105
3.5	Reação Álcali-Agregado.....	109
4	METODOLOGIA.....	113
4.1	Materiais.....	114
4.2	Métodos.....	115
4.2.1	Caracterização.....	115
4.2.1.1	Análise Química.....	115
4.2.1.2	Caracterização Mineralógica.....	115

4.2.1.3	Caracterização Petrográfica.....	115
4.2.1.4	Análise Granulométrica.....	116
4.2.2	Britagem	117
4.2.3	Moagem.....	118
4.2.4	Absorção de Água	119
4.2.5	Índice de Forma	120
4.2.6	Ensaio com Concreto para Pré-moldados	121
4.2.7	Ensaio com Argamassa.....	122
4.2.8	Índice de Degradação Proctor - IDp.....	126
4.2.9	Abrasão Los Angeles.....	128
4.2.10	Ensaio Treton.....	130
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	132
5.1	Caracterização	132
5.2	Cominuição.....	139
5.3	Utilização como Agregado para Argamassa e Concreto.....	145
5.4	Utilização como Base para Pavimentação.....	152
6	CONCLUSÕES.....	155
7	SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	158
8	RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS.....	159
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	160

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1 Exemplos de rochas ornamentais produzidas no Brasil (www.abirochas.com.br, acessado em 16-06-2011).....	24
Figura 3-2 Lavra de matação – Gandu-Ba (da Mata, 2007).....	30
Figura 3-3 Tipos de lavras de rochas ornamentais (Chiodi Filho, 1995).....	31
Figura 3-4 Terreno em planície ou platô – Lavra em fossa ou em poço.....	32
Figura 3-5 Lavra em fossa (esquerda) e poço (direita) (da Mata, 2003).....	32
Figura 3-6 Lavra por desabamento.....	33
Figura 3-7 Método das fatias horizontais - Lavra por bancadas.....	34
Figura 3-8 Lavra por bancadas altas – Tombamento (esquerda) e desdobramento (direita) de bloco (da Mata, 2003).....	34
Figura 3-9 Método de fatias horizontais – Lavra por degraus.....	35
Figura 3-10 Lavra por degraus - Degraus múltiplos (Instituto Geológico Mineiro).....	35
Figura 3-11 Lavra por fatias verticais.....	36
Figura 3-12 Esquema de corte de plano vertical em maciço por fio diamantado.....	37
Figura 3-13 Corte vertical com fio diamantado em maciço de esteatito (Almeida, 2006).	38
Figura 3-14 Colocação de cunhas para corte em esteatito (Almeida, 2006).....	39
Figura 3-15 Tear multi-lâminas utilizado no corte de rochas ornamentais (Coimbra Filho, 2006).....	40
Figura 3-16 Talha-bloco monodisco com disco diamantado de grande dimensão (Coimbra Filho, 2006).....	41

Figura 3-17 Extração e corte de placas em quartzito foliado (Pires, 2007).	41
Figura 3-18 Máquinas de polimento manual (esquerda) e automático (direita) usadas no beneficiamento do quartzito extraído em Ouro Preto (Pires, 2007).	42
Figura 3-19 Taludes de depósito de rejeitos de quartzito – Alpinópolis.	44
Figura 3-20 Disposição desordenada (esquerda) e tanque de decantação de rejeitos finos em polpa provenientes de polimento de quartzito (direita) em Ouro Preto. (Pires, 2007).	44
Figura 3-21 Reconstituição de taludes de resíduo de quartzito em São Tomé das Letras (Deschamps et al, 2002).	45
Figura 3-22 Bota fora de lavra de esteatito (Almeida, 2006).	45
Figura 3-23 Fluxograma de ensaios de cominuição e concentração de rejeitos de granito para uso em indústria cerâmica (Dutra, 2006).	48
Figura 3-24 Confeção de tijolos de sílica-cal com rejeito de quartzito (Deschamps et al, 2002).	54
Figura 3-25 Planta de britagem de rejeito de quartzito – São Tomé das Letras (Deschamps et al, 2002).	54
Figura 3-26 Utilização do quartzito como material de acabamento (Pires, 2007).	58
Figura 3-27 Restauração de umbrais e verga em cantaria (Pereira, 2007).	59
Figura 3-28 Resíduos acima de maciço rochoso a ser explorado – Pirenópolis (GO) (Campos et al, 2003).	62
Figura 3-29 Impacto ambiental devido à extração de quartzito em encosta na região de Ouro Preto (Lima et al, 2005).	62
Figura 3-30 Distribuição granulométrica de amostras de rejeito de quartzito gerado em extração na serra do Taquaral – Ouro Preto (Lima et al, 2007).	63

Figura 3-31 Esquema de disposição controlada com uso de bermas (adaptado de Deschamps et al, 2002).....	64
Figura 3-32 Lavra em bancada executada em mineradora na serra da Canastra (Valadão et al, 2010).	66
Figura 3-33 Frente de lavra de grande porte para extração de quartzito foliado na região de Alpinópolis (CPRM, 2007).....	67
Figura 3-34 Remoção das placas em lavra de mineradora na serra da Canastra (Valadão et al, 2010).	68
Figura 3-35 Produção nacional de brita n° 2 por estado (de la Serna, 2010 – b).	72
Figura 3-36 Produção nacional de areia média por estado (de la Serna 2010 – b).	73
Figura 3-37 Zonas granulométricas de agregados graúdos.	75
Figura 3-38 Produção de agregados – Desmonte, carregamento e transporte.....	77
Figura 3-39 Fluxograma típico de planta de britagem e classificação para produção de brita 2 e frações menores.	78
Figura 3-40 Particularidades de britadores usados na produção de agregados (Guimarães et al, 2007).	79
Figura 3-41 Corte de um britador de mandíbulas de dois eixos (Peres et al, 2002).....	80
Figura 3-42 Corte de um britador giratório.	80
Figura 3-43 Extração e beneficiamento de agregado graúdo (Rodrigues, 2004).	81
Figura 3-44 Classificação de agregados miúdos por distribuição granulométrica.	84
Figura 3-45 Faixas granulométricas máximas e mínimas de agregados miúdos.	85
Figura 3-46 Extração de areia em cava seca.....	88
Figura 3-47 Extração de areia em cava submersa (evoluída de cava seca).	89

Figura 3-48 Extração de areia em leito de rio.	90
Figura 3-49 Cavas submersas para extração de areia (Mechi e Sanches, 2010).	91
Figura 3-50 Relação <i>consumo de cimento x resistência à compressão</i> em argamassas (Martins Neto e Djanikian, 1999).	94
Figura 3-51 Porcentagem de finos x Relação <i>água/cimento</i> em argamassas (Benachour et al, 2008).	96
Figura 3-52 Porcentagem de finos x Tensão máxima à compressão em argamassas (Benachour et al, 2008).	96
Figura 3-53 Exemplo de curvas de produtos de moagem (Sampaio e Barbato, 2007). .	98
Figura 3-54 Pré-moldados de concreto.	100
Figura 3-55 Pavimentação com blocos retangulares de piso.	100
Figura 3-56 Difratoograma de amostra de corte de granito usado como adição em concretos (Gonçalves et al, 2002).	102
Figura 3-57 Esquema de funcionamento de vibro-prensa.	104
Figura 3-58 Distribuição de carga através das camadas de suporte de pavimento.	105
Figura 3-59 Alguns agregados usados em pavimentação (Bernucci et al, 2008).	107
Figura 3-60 Trincas características de ocorrência de R.A.A (Pinheiro, 2003).	111
Figura 3-61 Expansibilidade de argamassas - cimentos com adições minerais (Monteiro et al, 1997).	112
Figura 4-1 Fotos do britador de mandíbula usado nos ensaios – DEMIN/UFMG.	117
Figura 4-2 Foto do moinho usado nos ensaios – DEMIN/UFMG.	119

Figura 4-3 Amostras de rejeito de quartzito de grau de sanidade médio (esquerda) e grau de sanidade elevado (direita) submetidas a ensaios de absorção de água.	120
Figura 4-4 Corpos de prova moldados com quartzito como agregado (corpos de prova nos moldes, desmoldados e em cura por imersão)	122
Figura 4-5 Gráfico de distribuição granulométrica de agregados para ensaios de argamassa.....	123
Figura 4-6 Moldes e corpos de prova para ensaio de resistência à compressão em argamassas.	123
Figura 4-7 Ensaio de índice de consistência em argamassas (mesa de consistência). .	125
Figura 4-8 Molde cilíndrico para compactação Proctor, soquete e disco espaçador (DNER-ME 398, 1999).	126
Figura 4-9 Máquina (moinho) padronizada para se realizar o ensaio Los Angeles (DNER-ME 035, 1998).	129
Figura 4-10 Aparelho Treton (DNER-ME 399, 1999).....	131
Figura 5-1 Difratoograma de amostra de rejeito de quartzito estudado.	133
Figura 5-2 Quartzito branco de grau de sanidade médio – Comprimento de quadro de 0,940 mm.	134
Figura 5-3 Quartzito de grau de sanidade médio com indicação de porosidade – Comprimento de quadro de 0,940 mm.	135
Figura 5-4 Quartzito de grau de sanidade médio – Comprimento de quadro de 0,470 mm.	135
Figura 5-5 Quartzito de grau de sanidade médio – Comprimento de quadro de 0,940 mm.	136
Figura 5-6 Quartzito de grau de sanidade elevado com indicação de presença de sericita e fratura – Comprimento de quadro de 0,470 mm.....	136

Figura 5-7 Quartzito de grau de sanidade elevado com microfratura – Comprimento de quadro de 0,940 mm.	137
Figura 5-8 Quartzito de grau de sanidade elevado com ocorrência de rutilo – Comprimento de quadro de 0,230 mm.	137
Figura 5-9 Análise granulométrica em amostras de quartzito.	138
Figura 5-10 Corrente (A) ao longo do tempo em ensaio de britagem – APF 05 mm. .	139
Figura 5-11 Corrente (A) ao longo do tempo em ensaio de britagem – APF 06 mm. .	140
Figura 5-12 Corrente (A) ao longo do tempo em ensaio de britagem – APF 10 mm. .	140
Figura 5-13 Britagem - Gráfico das distribuições granulométricas dos produtos para três aberturas de mandíbula e para a alimentação.	142
Figura 5-14 Moagem – Gráfico de distribuições granulométricas da alimentação e produtos para vários tempos.	144
Figura 5-15 Concreto para pré-moldados com rejeito de quartzito como agregado - Análise gráfica dos resultados de resistências à compressão.	147
Figura 5-16 Argamassa com rejeito de quartzito como agregado - Variação do índice de consistência X relação água / aglomerante.	148
Figura 5-17 Resistência à compressão de argamassas com rejeito de quartzito # < 1,2mm.	150
Figura 5-18 Resistência à compressão de argamassas com rejeito de quartzito # < 2,4mm.	151
Figura 5-19 Distribuições granulométricas - Compactação Proctor.	152

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 Rochas ornamentais – Classificação por origem.....	21
Tabela 3-2 Rochas ornamentais metamórficas (Fontes, 1984).....	22
Tabela 3-3 Rochas ornamentais sedimentares (adaptado de Fontes, 1984)	23
Tabela 3-4 Produção de rochas ornamentais por regiões e produtos (Chiodi Filho, 2008)	25
Tabela 3-5 Etapas de pesquisa de rochas ornamentais (adaptado de da Mata, 2007)	29
Tabela 3-6 Tipos de disposição de resíduos gerados na exploração de rochas ornamentais.....	43
Tabela 3-7 Propriedades de peças cerâmicas produzidas com rejeito de extração e corte de ardósia (Catarino et al, 2003).....	50
Tabela 3-8 Pesquisadores: Aplicação de resíduos de rochas ornamentais	52
Tabela 3-9 Caracterização de rejeito de quartzito como agregado graúdo (Ramírio et al, 2008).....	53
Tabela 3-10 Trabalhos realizados de recuperação de rejeitos de quartzito na cidade de Pirenópolis (AGIM, 2002).....	55
Tabela 3-11 Reservas de quartzito ornamental em Minas Gerais (DNPM, 2006)	56
Tabela 3-12 Aplicações de quartzito na construção civil e como artesanato	60
Tabela 3-13 Composição mineralógica de amostra de rejeito de quartzito gerado em exploração na serra do Taquaral – Ouro Preto (Lima et al, 2007).....	63
Tabela 3-14 Análise química de amostra de rejeito de quartzito gerado em exploração na serra do Taquaral – Ouro Preto (Lima et al, 2007).....	63

Tabela 3-15 Propostas para melhoria do processo extrativo de quartzito na serra da Canastra (adaptado de Valadão et al, 2010)	69
Tabela 3-16 Produção nacional de brita. 2006 à 2009 (de la Serna, 2010 - a).....	72
Tabela 3-17 Produção nacional de areia. 2006 à 2009 (de la Serna, 2010 - a)	72
Tabela 3-18 Faixas granulométricas de agregados graúdos (adaptado de NBR 7211, 2005).....	74
Tabela 3-19 Tipos de rochas usadas como agregados (Bernucci et al, 2008).....	76
Tabela 3-20 Classificação de agregados miúdos por faixas granulométricas (adaptado de NBR 7211, 1983).....	83
Tabela 3-21 Limites granulométricos máximos e mínimos para agregados miúdos (adaptado de NBR 7211, 2005)	85
Tabela 3-22 Tipos de argamassas e traços usuais – Argamassas dosadas em obras	93
Tabela 3-23 Tipos de argamassas e traços recomendados pela “Brick Industry Association” (B.I.A., 1988).....	94
Tabela 3-24 Resistências à compressão de argamassas produzidas com RCMG (Moura et al, 2002).....	101
Tabela 3-25 Composição química de RCMG usado na confecção de lajotas (Moura et al, 2002).....	102
Tabela 3-26 Composição química de rejeito de corte de granito usado como adição em concretos (Gonçalves et al, 2002).....	102
Tabela 3-27 Traços usados na confecção de blocos pré-moldados (ABCP, 1978 apud Sousa, 2001)	103
Tabela 3-28 Traços usados na confecção de blocos de concreto e respectivas previsões de resistências à compressão (Medeiros, 1993 apud Sousa, 2001)	103

Tabela 4-1 Resumo da metodologia utilizada	113
Tabela 4-2 Características gerais de amostras submetidas à análise petrográfica.....	116
Tabela 4-3 Traços e consumos de água empregados nos ensaios com concreto.....	121
Tabela 4-4 Faixas granulométricas de amostra padrão para ensaio IDp (DNER-ME 398, 1999).....	127
Tabela 4-5 Cálculo de IDp (DNER-ME 398, 1999).....	128
Tabela 4-6 Graduações para ensaio “Los Angeles” (DNER-ME 035, 1998)	129
Tabela 5-1 Resultado de análise química	132
Tabela 5-2 Resultado de análise granulométrica em amostra de pedrisco, brita A e brita B	138
Tabela 5-3 Cálculo de consumo energético na britagem do rejeito de quartzito	141
Tabela 5-4 Britagem - Distribuições granulométricas dos produtos para três aberturas de mandíbula e para a alimentação.....	142
Tabela 5-5 Moagem – Distribuições granulométricas da alimentação e produtos para vários tempos.....	143
Tabela 5-6 Resultados de absorção	145
Tabela 5-7 Resultados de índice de forma	145
Tabela 5-8 Concreto para pré-moldados com rejeito de quartzito como agregado - Resultados de resistências à compressão.....	146
Tabela 5-9 Argamassa com rejeito de quartzito como agregado - índice de consistência X relação água / aglomerante	148
Tabela 5-10 Argamassa com rejeito de quartzito como agregado - Resultados de ensaio de ruptura variando o diâmetro máximo do agregado.....	149

Tabela 5-11 Índices de consistência e resistência à compressão de argamassas em traços variados.....	150
Tabela 5-12 Resultados de índice de degradação Proctor	152
Tabela 5-13 Resultados do ensaio de abrasão Los Angeles	153
Tabela 5-14 Resultados do ensaio de perda ao choque no aparelho Treton.....	154

RESUMO

O consumo de agregados para a construção civil tem aumentado consideravelmente nos últimos anos no Brasil. A extração de areia e brita gera um considerável impacto ambiental inviabilizando a operação em vários casos e, ainda, à medida que vão se esgotando as pedreiras e depósitos de areia próximos aos centros urbanos, o valor do produto vai aumentando. Paralelamente, a extração de quartzito (rocha ornamental) em Minas Gerais é feita predominantemente em empresas de pequeno porte e apresenta uma recuperação muito baixa gerando por volta de seis milhões de toneladas de rejeito por ano, o que acarreta poluição, aumento de custo do produto final, diminuição da vida útil das jazidas e até o fechamento de empresas por questões ambientais. Assim, agregar valor a esse resíduo tem sido visto, tanto pelos produtores, como por órgãos do governo, como a melhor chance de desenvolvimento para o setor.

O objetivo deste trabalho, então, é estudar aplicações para o rejeito de extração de quartzito como agregado na construção civil. Para tal, foi realizada uma revisão da literatura sobre extração de rochas ornamentais, resíduos gerados, propostas de reciclagem para esses rejeitos, bem como sobre agregados para a construção civil. Amostras de rejeito de quartzito, obtidas em uma pedreira piloto, foram caracterizadas em termos de absorção de água, distribuição granulométrica, composição química, composição mineralógica e descrição petrográfica. As amostras foram submetidas à britagem e à moagem com o objetivo de analisar a viabilidade técnica e a econômica de se cominuir o material mais grosseiro gerando um produto aplicável na produção de pré-moldados de concreto e argamassas industrializadas. Foram moldados e rompidos corpos de prova de concreto com traços e relações água/cimento específicos para produção de pré-moldados. Em seguida, argamassas com variações de traço, distribuição granulométrica de agregado e consumo de água foram analisadas quanto à trabalhabilidade e à resistência à compressão. Foram feitos, também, ensaios de degradação, abrasão, perda ao choque e índice de forma. Com exceção das dimensões alongadas do agregado gráudo obtido, os resultados indicaram possibilidade de se aplicar o rejeito de quartzito em camadas de base para pavimentação. Concluiu-se, ainda, que o rejeito pode ser aplicado como agregado para argamassas industrializadas e para produção de pré-moldados dentro de variadas faixas de resistência à compressão, abrangendo diferentes aplicações.

ABSTRACT

The consumption of aggregates in the civil construction has increased considerably lately in Brazil. The extraction of sand and gravel generates significant environmental impacts. As the quarries and sand deposits are getting exhausted near the big cities, the price of the aggregates is increasing. Meanwhile, the extraction of quartzite (dimensional stone) in the state of Minas Gerais has been done mostly in small quarries, with very low recovery. It generates approximately six million tons of waste by year, what brings pollution, increasing of final prices of products, decrease of the life time of the quarries, and the closing of enterprises. The government agencies and the quarries owners understand that only finding some application to this waste, will bring development and sustainability to the sector.

The aim of this investigation is to study the application to the quartzite waste as aggregate in the civil construction. A literature review was done addressing extraction and waste generation in dimension stones quarries and the current technology in applications of this waste as raw materials in civil construction. Samples of quartzite wastes collected in a quarry were characterized by water absorption, size distribution, X-ray diffraction, and chemical and petrographic analyses. Laboratory tests of crushing and milling were done to analyze the technical and economic viability of reduce the size of coarse material to a finer one to be used as raw material in industrialized mortars and concrete pre-molded components. Samples of concrete using quartzite waste as aggregate were molded in proportions and water content used in production of pre-molded components to analyze the final compressive strength. Then, samples of mortars with quartzite waste as aggregate were molded with variations in proportion, water content and top size of aggregates to analyze the workability and final compressive strength. The coarser material was analyzed with tests of degradation, abrasion, loss by impact and particle shape. With the exception in the elongated fragments generated by breakage in the crusher, the results indicated the possibility of applying the material as aggregate in base or sub base for flexible pavements. There was no restriction in applying the quartzite waste as aggregate in the production of industrialized mortars and pre-molded components.

1 INTRODUÇÃO

O ser humano sempre utilizou as rochas devido à resistência, à trabalhabilidade e à beleza natural que elas apresentam. Ao longo da história humana, as rochas sempre se mostraram como alternativas em termos de material para construções, principalmente de moradias, templos, armas, ferramentas, sistemas de transporte, sistemas de defesa e aquedutos. Várias civilizações tiveram marcos históricos representativos feitos com o uso de rochas há várias centenas ou até mesmo milhares de anos, como as pirâmides no Egito, o Coliseu em Roma e a muralha na China.

A humanidade, gradativamente, passou a utilizar materiais de diferentes origens, porém, com exceção de alguns poucos exemplos, como lã animal e madeira, todos os outros dependem das rochas como matéria prima (cerâmica, adobe, cal, vidro, cimento portland e ligas metálicas), sem contar as rochas que são empregadas sem perder as características originais, ou seja, as rochas ornamentais aplicadas ao longo da história como peças de revestimento, estruturas, alvenarias ou obras de arte.

Ao longo dos séculos XVIII e XIX, com o desenvolvimento dos sistemas de transporte terrestre e marítimo, o comércio mundial de rochas ornamentais começou a desenvolver-se. Até então as jazidas conhecidas se encontravam em regiões consagradas como centros produtores, e as rochas extraídas atendiam apenas ao público que podia pagar altos preços.

Até o advento do cimento e do aço, as rochas eram as únicas opções para a execução de sistemas estruturais de maior porte e durabilidade (nos quais a madeira não atendia), porém as grandes limitações das rochas eram suportarem adequadamente apenas esforços de compressão e proporcionarem estruturas de elevado peso próprio. Após o início do emprego do concreto armado e da estrutura metálica, cujas peças poderiam resistir a outros esforços que não a compressão (flexão, tração e até torção) as rochas passaram a ter funções primordialmente de revestimento e escultural, recebendo, inclusive, a denominação de “rochas ornamentais”.

No fim do século XIX e início do século XX, ocorreu um importante desenvolvimento dos métodos de prospecção, lavra e beneficiamento de rochas ornamentais, concomitantemente ao aparecimento de novos equipamentos e tecnologias impulsionados pela revolução industrial, o que levou ao aparecimento de centros produtores que passaram a fornecer novos produtos ao mercado mundial que já se encontrava em expansão.

No século XX, apesar de certa estagnação durante a primeira e segunda grandes guerras, o comércio mundial de rochas ornamentais apresentou grande desenvolvimento. Porém foi na década passada, a primeira do século XXI, que houve um aquecimento vertiginoso desse comércio.

Segundo a Abirochas (Associação Brasileira de Rochas Ornamentais), a produção brasileira de rochas ornamentais teria somado 7,8 milhões de toneladas em 2008 (Abirochas, 2009). No caso específico do quartzito, estima-se que a produção brasileira esteja por volta de 500.000 toneladas, sendo a grande maioria em Minas Gerais.

Em se tratando de quartzito, a extração gera uma quantidade expressiva de resíduo. Segundo Ramirio et al (2008), que analisaram dados de mineradoras do sudoeste de Minas Gerais, pode-se gerar uma quantidade de rejeito correspondente a até 92% do material extraído. Sendo a produção anual de cerca de 500.000 toneladas de quartzito em Minas Gerais, o montante de resíduos gerados anualmente pode chegar a quase seis milhões de toneladas.

A geração de resíduo é o principal desafio hoje das indústrias que extraem quartzito. O baixo aproveitamento do material extraído torna-se um grave problema devido aos seguintes fatores:

- **Meio Ambiente** → Ao se gerar menos resíduos, tende-se a uma menor degradação ambiental em termos de assoreamento de rios, geração de poeira, degradação visual etc.
- **Lucro** → Geração de grandes quantidades de rejeito levam a maior volume de quartzito lavrado, elevando o custo de produção.

- **Jazidas** → Quanto menor a relação “*produto / volume extraído*”, pior o aproveitamento da jazida.
- **Exportações** → Para que se consiga negociar produtos no mercado exterior, principalmente no europeu e norte-americano, é imprescindível que a empresa possua certificações internacionais, entre elas, as certificações ambientais. E uma política de gestão de resíduos favorece a obtenção dessas certificações.
- **Logística** → Quanto mais resíduos gerados, maior o custo (carregamento, transporte, disposição, multas ambientais, etc.), o tempo (manejo do rejeito) e a área demandada para disposição.
- **Fechamento de Mina** → Pela legislação em vigor, a mineradora não é responsável pelos resíduos de processo apenas durante a vida útil da jazida e operação do empreendimento, mas também após o encerramento dos trabalhos.

Nos últimos anos, houve a intensificação da fiscalização por órgãos federais e estaduais das empresas que extraem quartzito, ocasionando, inclusive, o fechamento de pedreiras devido à elevada geração e disposição desordenada dos rejeitos.

As duas principais maneiras de se reduzir a geração de resíduos são a otimização da operação como um todo (prospecção, lavra e beneficiamento) e estudos envolvendo a aplicação dos rejeitos como insumos em outras atividades produtivas. No caso deste trabalho, os esforços são direcionados ao aproveitamento dos resíduos gerados como insumos para a construção civil.

2 OBJETIVO

- *Objetivo Geral:*

Estudar a aplicação de rejeitos de extração de quartzito da região da serra da Canastra como agregado na construção civil.

- *Objetivos Específicos:*

- a. fazer revisão bibliográfica sobre processos produtivos, geração de resíduos e aproveitamento dos mesmos no caso de rochas ornamentais em geral e no caso específico do quartzito;
- b. caracterizar amostras de rejeito com relação à absorção de água, distribuição granulométrica, petrografia e composições química e mineralógica;
- c. submeter o resíduo a operações de britagem e moagem com o objetivo de verificar a viabilidade técnica de sua utilização em diferentes faixas granulométricas;
- d. estudar a viabilidade de se aplicar rejeito de extração de quartzito, como:
 - agregado para pré-moldados de concreto (tamanho < 6,3mm);
 - agregado miúdo para argamassa industrializada (tamanho < 2,4mm);
 - camadas de base e sub-base em pavimentação (tamanho > 6,3mm).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Rochas Ornamentais

As rochas, de modo geral, são divididas de acordo com a sua origem em rochas ígneas (ou magmáticas), rochas metamórficas e rochas sedimentares. Uma descrição do processo que origina cada tipo de rocha, bem como exemplos de rochas ornamentais representativas de cada grupo são mostrados na tabela 3.1.

Tabela 3-1 Rochas ornamentais – Classificação por origem (Fontes, 1984)

Nomenclatura	Origem	Exemplos (Rochas Ornamentais)
Ígneas ou Magmaicas	Provêm da solidificação do magma. Podem ser originadas no interior da crosta terrestre (plutônicas) ou na superfície (vulcânicas).	Granitos
Metamórficas	Formadas a partir da transformação de rochas ígneas, metamórficas ou sedimentares através de submissão a parâmetros térmicos, mecânicos e químicos sem ocorrer fusão da rocha.	Mármore
		Gnaisses
		Ardósias
		Quartzitos
Sedimentares	Formadas de materiais originados da decomposição mecânica ou química, desagregação e transporte de outros tipos de rocha.	Arenitos
		Folhelhos
		Calcários
		Travertinos

Dentre as rochas ígneas, destacam-se os granitos como principal exemplo de aplicação como rocha ornamental. Possuem em média 71,5% de SiO₂. Mais de 2/3 dos feldspatos que as constituem estão na forma de feldspatos potássicos, sendo o teor de quartzo muito alto (rocha ácida).

As rochas metamórficas têm suas características dependentes dos minerais presentes na rocha matriz, bem como das características do meio onde ocorreu o processo de metamorfismo (temperatura, pressão e composição química). A tabela 3.2 a seguir mostra exemplos de rochas ornamentais que se originaram via metamorfismo e as classes químicas das mesmas (Fontes, 1984).

Tabela 3-2 Rochas ornamentais metamórficas (Fontes, 1984)

<i>Material de Origem</i>	<i>Classes Químicas</i>	<i>Rochas Ornamentais Geradas</i>
Arenitos, Quartzitos, Granitos etc.	Rochas Quartzo Feldspáticas	Granito, Gnaisse e Quartzito
Argilitos, Folhelhos etc.	Rochas Aluminosas	Ardósia
Calcários e Dolomitos	Rochas Carbonáticas	Mármore
Peridotitos e Serpentinóis	Rochas Magnesianas	Esteatito (pedra sabão)

Abaixo são apresentadas algumas características de rochas ornamentais metamórficas:

- **Gnaisse** – Constituído de quartzo, feldspato e mica (biotita). Apresenta, normalmente, nítida segregação dos minerais claros e escuros em bandamentos alternados, formando a foliação gnáissica. Além disso, possui grau de metamorfismo de médio a forte e deriva de rochas ígneas ou sedimentares.
- **Quartzito** – Provêm principalmente do metamorfismo de arenitos.
- **Ardósia** – Rocha de baixo grau de metamorfismo, derivada de argilitos ou siltitos. Pode ser considerada uma transição entre rochas sedimentares e metamórficas.
- **Mármore** – Rocha oriunda da metamorfose dos calcários por recristalização, constituída de calcita e dolomita.
- **Esteatito (pedra sabão)** – Rocha composta, essencialmente, por talco e clorita com xistosidade pouco pronunciada, originada do metamorfismo de rochas ígneas ultrabásicas.

Já as rochas sedimentares são oriundas do acúmulo de materiais de outras rochas que as precederam. A formação de uma rocha sedimentar ocorre segundo uma sequência de eventos chamada *ciclo sedimentar*, cujas etapas básicas são:

- decomposição das rochas pré-existentes (intemperismo);
- remoção e transporte dos produtos do intemperismo;
- deposição dos sedimentos;
- consolidação dos sedimentos.

A tabela 3.3 abaixo apresenta as classificações de rochas sedimentares em função da origem.

Tabela 3-3 Rochas ornamentais sedimentares (adaptado de Fontes, 1984)

<i>Classificação das Rochas Sedimentares</i>		<i>Rochas Geradas</i>			
<i>Clásticas:</i> Provenientes de sedimentos mecânicos (material detrítico)	Residuais - Depósito de material grosseiro		Areia Quartzífera		
	Epiclásticas - Material detrítico. Partículas consolidadas por compressão ou cimentação	Psefitos ou Conglomerados (partículas > 2mm)	Partículas unidas por cimentação	Arenito Argiloso (Cimento argiloso)	
		Psamitos (0,05 < part < 2mm)		Arenito Calcário (Cimento Calcário)	
				Arenito Ferruginoso (Cimento Ferruginoso)	
		Pelitos (partículas < 0,05mm)		Partículas unidas por compressão	Arenito Micáceo (Cimento Micáceo)
		Argilitos e Folhelhos (Partículas de Argila)			
	Piroclásticas - Consolidação de material de explosões vulcânicas		Tufo Vulcânico		
Brecha Vulcânica					
<i>Químicas:</i> Provenientes de precipitação de substâncias nas águas dos mares ou lagoas salgadas.	Evaporitos - Evaporação da água e precipitação dos sais (↓)		Calcários, Gipsito		
	Atividade Bioquímica - Organismos transformam sais solúveis em insolúveis (↓)		Calcários, Travertinos dolomitos (<50% dolomita)		
<i>Orgânicas:</i> Derivadas de resíduos orgânicos de qualquer natureza.	Caustobiólitos - Rochas Combustíveis		Turfa, Lignito, Hulha, Antracito e Petróleo		
	Acaustobiólitos - Rochas não Combustíveis		Carbonatadas (calcários de recifes, corais...), Silicosas e Fosfatadas		

A ABIROCHAS apresenta vários tipos de rochas ornamentais extraídos no Brasil. A figura 3.1 mostra exemplos de algumas dessas rochas.

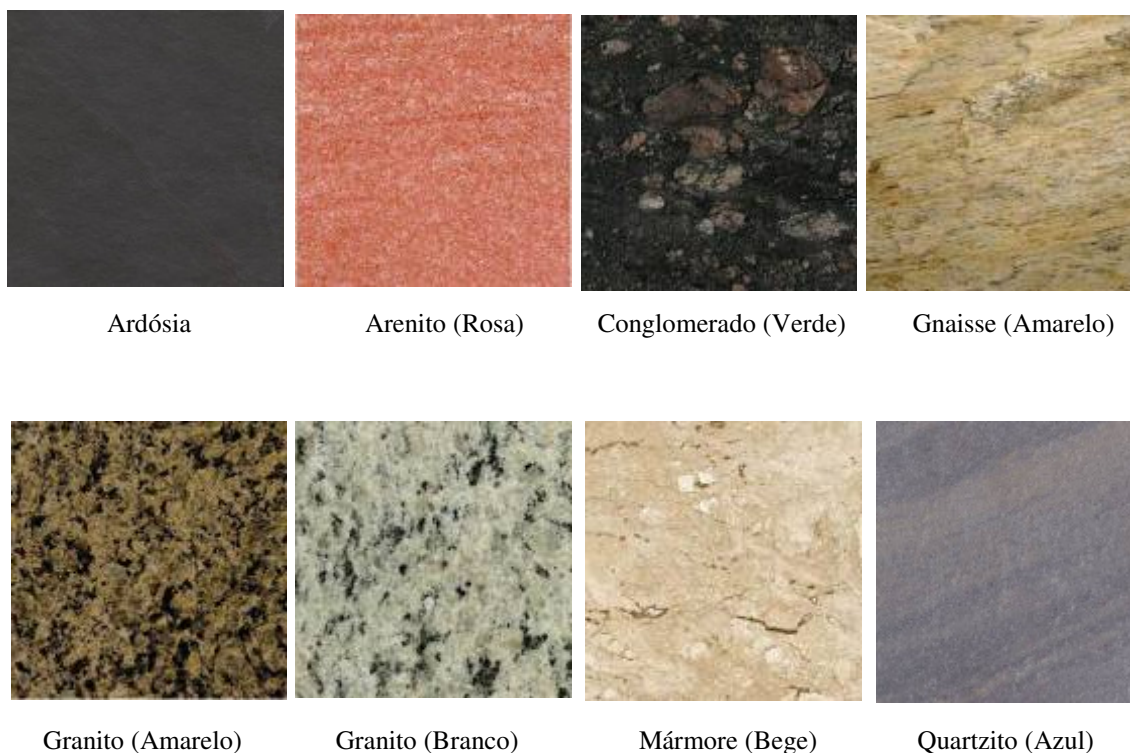


Figura 3-1 Exemplos de rochas ornamentais produzidas no Brasil (www.abirochas.com.br, acessado em 16-06-2011).

A região sudeste é a principal região produtora de rochas ornamentais do Brasil com mais de 70% da produção nacional. Minas Gerais é o segundo estado em termos de produção, ficando apenas atrás do Espírito Santo. A distribuição da produção brasileira por estado e tipo de rocha em 2007 é mostrada na tabela 3.4, apresentada por Chiodi Filho (2008).

Tabela 3-4 Produção de rochas ornamentais por regiões e produtos (Chiodi Filho, 2008)

Região	Estados	Produção (1000 t)	Tipo de Rocha
Sudeste	Espírito Santo	3200	Granito e Mármore
	Minas Gerais	2200	Granito, ardósia, quartzito foliado, pedra sabão, pedra talco, serpentinito, mármore e basalto
	Rio de Janeiro	200	Granito, mármore e pedra Paduana
	São Paulo	100	Granito, quartzito foliado
Sul	Paraná	110	Granito, mármore e outros
	Rio Grande do Sul	100	Granito, basalto e quartzito
	Santa Catarina	100	Granito e ardósia
Centro Oeste		300	Granito, quartzito foliado, serpentinito e mármore
Norte e Nordeste	Bahia	600	Granito, mármore, travertino, arenito e quartzito
	Ceará	400	Granito e pedra Cariri
	Paraíba	300	Granito e conglomerado
	Pernambuco	100	Granito e quartzito
	Alagoas	50	Granito
	Rondônia	50	Granito
	Rio Grande do Norte	80	Mármore e granito
	Pará	20	Granito
Piauí	70	Pedra Morisca	
Total Brasil		7970	

Em se tratando de rochas ornamentais, o padrão de qualidade comercial é definido, primordialmente, segundo as características estéticas do material. Destacam-se o padrão cromático, o desenho, a textura e a granulação, sendo que, dentre essas características, o padrão cromático é o principal atributo considerado para a qualificação de uma rocha ornamental. Costa et al (2001) apresentaram uma classificação das rochas ornamentais extraídas em Minas Gerais segundo a composição e a coloração:

- ***Granitos ornamentais***

Apresentam granulação variada e podem não corresponder aos denominados granitos verdadeiros. São classificados em:

- granitos quartzo-feldspáticos - Granitos verdadeiros e gnaisses;
- granitos feldspáticos (sienitos) e anortositos;
- granitos máficos - Rochas básicas (gabros de granulação fina e basaltos).

- ***Quartzitos ornamentais***

Com relação à cristalização e à composição podem ser:

- quartzitos com alto grau de recristalização e granulação fina, constituídos essencialmente por quartzo. Apresentam propriedades típicas dos chamados granitos comerciais;
- quartzitos com alto conteúdo em minerais micáceos, apresentando foliação bem desenvolvida em função da disposição preferencial desses minerais;
- quartzitos pouco cristalizados que, a partir da análise petrográfica, podem ser classificados como meta-arenitos;
- quartzitos com alto conteúdo de feldspato (meta-arcósios).

- ***Mármore***

Em função do grau metamórfico, os mármore apresentam granulação variando de fina até média. Com qualificação ornamental ou de revestimento, destacam-se os tipos de grão fino, com larga aplicação no setor estatuário. Destacam-se os tipos:

- carbonáticos sedimentares;
- metamórficos propriamente ditos.

- ***Ardósias***

- ***Esteatitos e Serpentinóis***

3.1.1 Pesquisa Geológica e Caracterização Tecnológica

Segundo Chiodi Filho (1995), vários são os parâmetros de interesse que devem ser levados em conta ao se planejar o aproveitamento de determinada área. Os principais são apresentados abaixo:

- 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 recomendado de lavra.

Ainda, segundo o mesmo autor, tanto em programas exploratórios regionais, quanto na pesquisa de detalhe, os levantamentos geológicos são orientados para a definição de bons materiais, em condições físicas e quantidades apropriadas para o aproveitamento.

Em âmbito regional, a simples distinção dos ambientes geológicos permite prever a ocorrência para diferentes tipos de rocha. Já os objetivos da pesquisa de detalhe estão relacionados à qualificação dos materiais e viabilização da lavra. Assim os trabalhos envolvem:

- reconhecimento e amostragem das variedades litológicas aflorantes;
- caracterização petrográfica de rochas selecionadas;
- tipificação e caracterização comercial dos materiais priorizados;
- cálculo de reservas;

- definição de métodos de lavra;
- testes de serragem e polimento;
- avaliação de mercado dos produtos.

Caso não se tenha informações suficientes ao início de determinado empreendimento, este pode defrontar-se com problemas inesperados relativos à operação e à qualidade dos produtos.

Dentre os ensaios de caracterização tecnológica de amostras de rochas ornamentais, seis são designados como “índice de qualidade”: (Chiodi Filho 1995)

- *análise petrográfica* – Define, em seções delgadas e polidas, a composição em minerais transparentes (silicatos e carbonatos) e opacos (óxidos e sulfetos). Permite a classificação da rocha, a observação de alterações metassomáticas e intempéricas, bem como a anotação de microfissurações;
- *índices físicos* – Determinam a massa específica (densidade), a porosidade aparente e a absorção de água;
- *desgaste Amsler* – Mede a resistência do material à solitação abrasiva;
- *compressão Uniaxial* – Determina a resistência ao cisalhamento (também chamada compressão ao natural ou simples);
- *resistência à tração na flexão* - Avalia a resistência do material à ruptura por flexão;
- *coeficiente de dilatação térmica linear* - Mede a dilatação do material em condições de temperatura crescente.

Da Mata (2007) apresentou um roteiro básico para pesquisa de rocha ornamental (aceito pelo 7º DS/DNPM), através de questionários específicos aplicados a técnicos que acompanham e analisam projetos de pesquisa para rochas ornamentais. As etapas usuais necessárias para pesquisa de rochas ornamentais são apresentadas na tabela 3.5 a seguir.

Tabela 3-5 Etapas de pesquisa de rochas ornamentais (adaptado de da Mata, 2007)

1	Estudos bibliográficos	Introdução (bibliografia, mapas geológicos, imagens de satélites, etc.)		
		Fisiografia (morfologia, vegetação, drenagem e clima)		
		Infraestrutura (acesso, energia elétrica, comunicação, água, etc.)		
		Geologia regional (principais ambientes geológicos e litologias)		
		Unidades de conservação ambiental		
2	Metodologia - trabalhos técnicos realizados	Constatação in loco de informações dos estudos bibliográficos		
		Levantamento topográfico planialtimétrico de detalhe		
		Mapeamento geológico / estrutural	Características da rocha (composição, textura ...)	
			Morfologia (inclinações do corpo)	
			Grau de fraturamento, diques, veios	
			Características de afloramento e de cobertura	
			Relevo, condições de acesso e infraestrutura	
		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 de pré-exequibilidade econômica de lavra – Análise de mercado			
5	Apresentação do relatório final de pesquisa			
6	Conclusão			

3.1.2 Lavra

Segundo Chiodi Filho (1995), a divisão básica entre os tipos de lavra de rochas ornamentais dá-se segundo a natureza principal da frente. Basicamente, a operação pode dar-se por *matacões* ou por *maciços rochosos*.

Matacões constituem porções específicas de um maciço rochoso, individualizados a partir da atuação de agentes intempéricos nas fraturas e destacados por erosão. Em alguns casos, parte dos matacões não são aflorantes, sendo detectados e expostos somente após grande remoção de solo. Lavras por matacões geralmente apresentam baixo custo de produção, porém com baixa produtividade, qualidade inferior do produto, alto impacto paisagístico e maiores danos ao meio ambiente. São as rochas silicáticas que formam matacões aproveitáveis.

A figura 3.2 abaixo (da Mata 2003) mostra um matacão sendo cortado em Gandu-Ba.



Figura 3-2 Lavra de matacão – Gandu-Ba (da Mata, 2007).

Quando a operação caracterizar-se por uma frente de lavra constituída por um maciço compacto a ser desmontado, removido e esquadrejado para posterior transporte ao local do beneficiamento, o processo é chamado de frente de lavra por maciço rochoso. Segundo Chiodi Filho (1995), as particularidades dos tipos de lavra de rochas ornamentais são apresentadas no esquema da figura 3.3. O tipo escolhido é definido em função, principalmente, da configuração topográfica do terreno e da litologia do maciço.

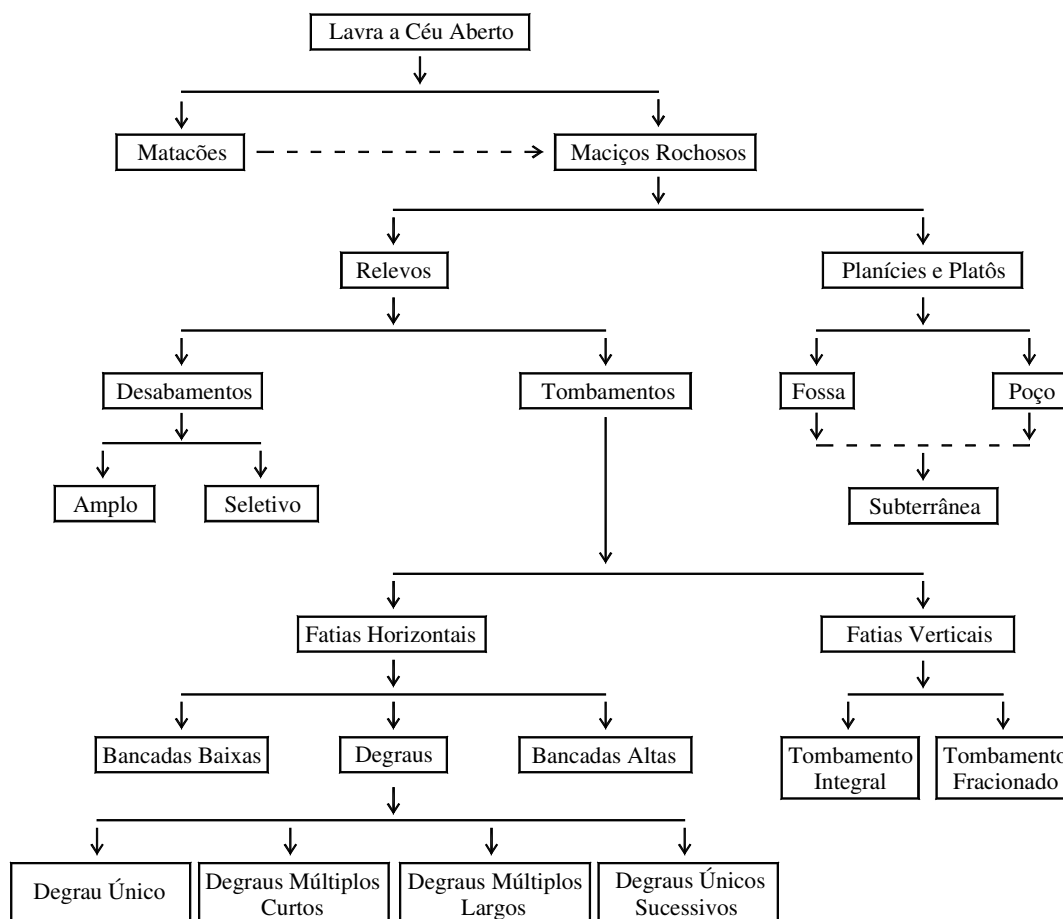


Figura 3-3 Tipos de lavras de rochas ornamentais (Chiodi Filho, 1995).

Para superfícies horizontais ou sub-horizontais, características de planícies ou de platôs elevados, a extração dá-se em cota inferior à cota natural do terreno, após a retirada do estéril. A frente de lavra será, então, do tipo fossa ou do tipo poço (também chamadas pedreira em cava). Nas pedreiras em fossa, as frentes de lavra situam-se imediatamente abaixo do nível do terreno, e os blocos são escoados por rampas. Já, nas pedreiras em poço, onde a cota de trabalho é ainda inferior em relação à cota de trabalho na extração

em pedreiras pelo método da fossa, a movimentação de blocos e equipamentos dá-se através de guindastes. As lavras tipo poço e tipo fossa apresentam problemas quanto ao contato com lençol freático, estabilidade de taludes, detonações e manobras de equipamentos nos pequenos espaços (figura 3.4).

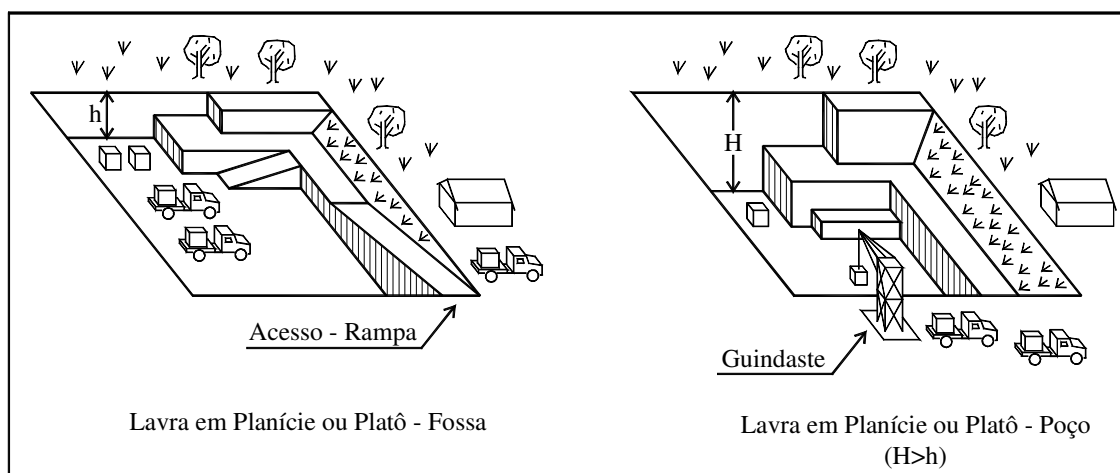


Figura 3-4 Terreno em planície ou platô – Lavra em fossa ou em poço.

Na figura 3.5 abaixo são mostrados exemplos de lavra de fossa e de poço.



Figura 3-5 Lavra em fossa (esquerda) e poço (direita) (da Mata, 2003).

Quando o terreno apresenta-se com declividade acima de 45° , e o material é fraturado ou não é de grande valor agregado, usa-se a lavra por desabamento. Nesse caso, procede-se à detonação na base do maciço. Esse método é considerado um tipo de lavra predatório por gerar uma grande quantidade de rejeitos, e está sendo colocado em desuso para rochas como mármore e granitos.

A lavra por *desabamento* pode ser feita por *desabamento seletivo*, quando se abrem trincheiras laterais com o objetivo de se limitar o volume detonado (aumenta o controle sobre o maciço detonado), ou mesmo, sem esta preocupação, caracterizando-se o método de *desabamento amplo*. Operacionalmente, grandes cargas de explosivos são colocadas em galerias de pequeno diâmetro, gerando-se pela detonação uma grande quantidade de material fragmentado. Como a energia sísmica é grande, eleva-se o risco de desmoronamentos não controlados. A segurança é precária, a produção descontínua e o impacto ambiental enorme (figura 3.6).

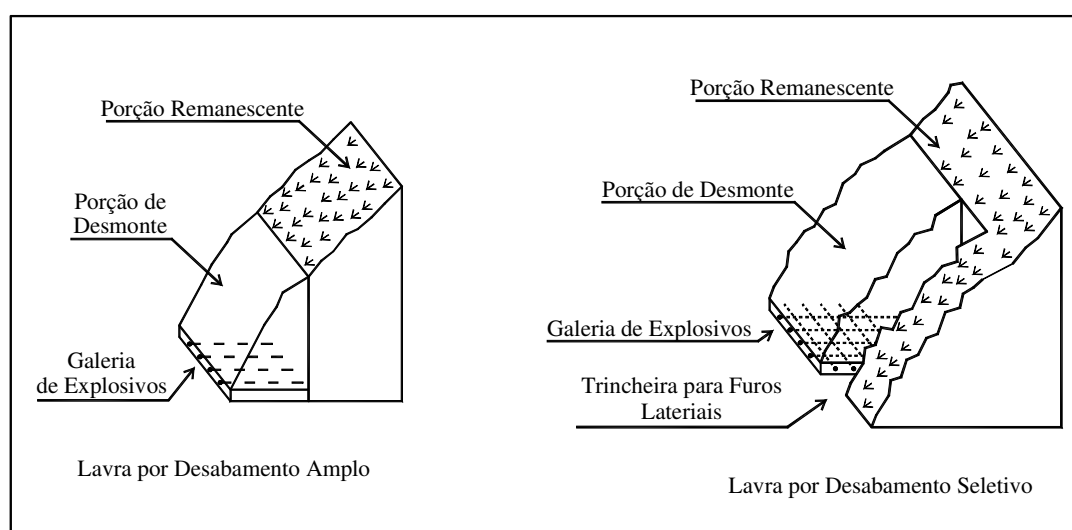


Figura 3-6 Lavra por desabamento.

Quando se tem um maciço rochoso pouco fraturado, em que seja possível a extração de blocos, evita-se o método do desabamento e aplica-se o método do tombamento, que pode ser feito por fatias verticais ou horizontais. Esse método gera menos resíduo, porém demanda maior etapa de estudos geológico/estruturais, bem como planejamento. Para relevos de baixa a média declividade (até 40%), aplicam-se os métodos de fatias horizontais. Caso contrário, se o relevo for mais inclinado, recomenda-se o método das fatias verticais:

- Tombamento de Fatias Horizontais – Lavra por bancadas;

No método do tombamento por fatias horizontais, são separados por detonação ou corte contínuo blocos sem altura suficiente para serem tombados. O método pode ser executado por bancadas baixas ou bancadas altas. No método de bancadas baixas, o bloco é separado do maciço e esquadrejado. No método de bancadas altas o bloco é separado do maciço, depois fracionado em blocos secundários, que, após tombamento, são novamente fracionados nos blocos finais (figura 3.7).

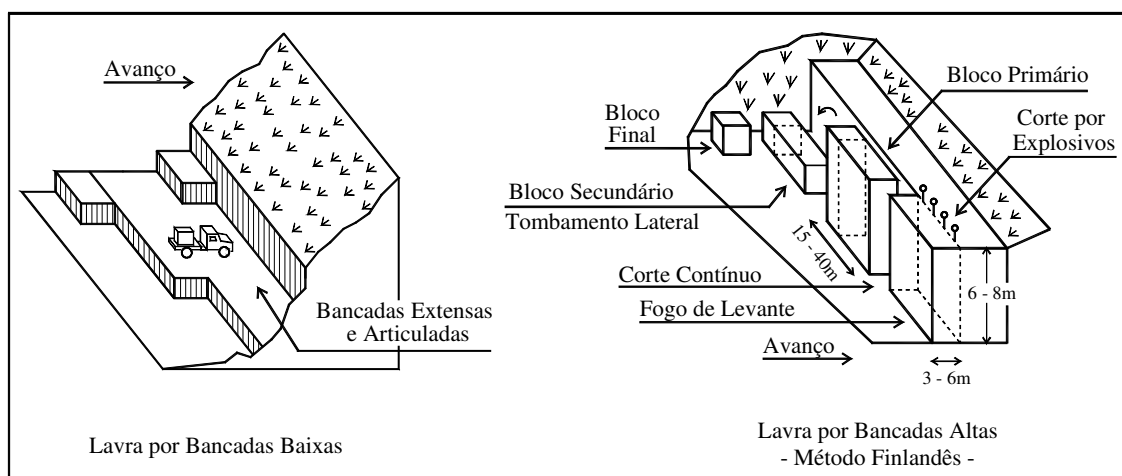


Figura 3-7 Método das fatias horizontais - Lavra por bancadas.
Adaptado de Chiodi Filho (1995)

A figura 3.8 abaixo mostra uma lavra por bancadas altas. À direita, vê-se o bloco primário já separado do maciço. À esquerda, é feito o desdobramento do bloco primário em blocos secundários.

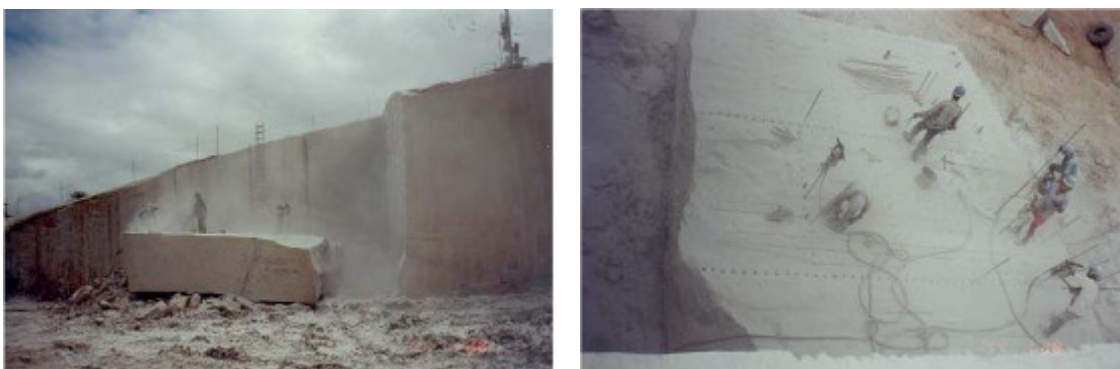


Figura 3-8 Lavra por bancadas altas – Tombamento (esquerda) e desdobramento (direita) de bloco
(da Mata, 2003).

- Tombamento de Fatias Horizontais – Lavra por Degraus

Quando as fatias horizontais são desenvolvidas sem formação de bancadas características com rampas de acesso e praças de trabalho definidas, com o material extraído caracterizando-se por blocos menores removidos em avanço horizontal, porém em níveis diferentes (em formação de escada), tem-se a chamada *lavra por degraus*. Dependendo da configuração do terreno, os degraus podem ser únicos, múltiplos ou sucessivos (Figura 3.9).

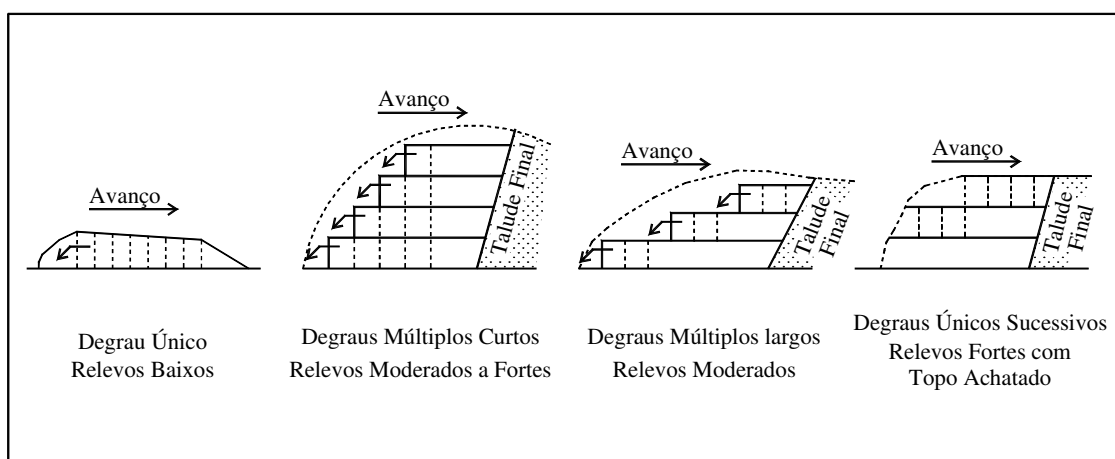


Figura 3-9 Método de fatias horizontais – Lavra por degraus.
Adaptado de Chiodi Filho (1995)

A figura 3.10 mostra exemplo de lavra por degraus múltiplos curtos. Vê-se a retirada de um bloco com uso de equipamento de grande porte (IGM _ Instituto Geológico Mineiro / Pt)



Figura 3-10 Lavra por degraus - Degraus múltiplos (Instituto Geológico Mineiro).

- Tombamento de Fatias Verticais

O método do tombamento vertical dá-se pela separação de blocos com altura que permita o seu tombamento, normalmente executado sobre colchão de material granulado. Esse método apresenta a desvantagem de se trabalhar com grandes áreas de corte e movimentações de grandes volumes (durante o tombamento), o que demanda mais cuidados quanto à segurança e ao planejamento. A queda, muitas vezes, gera rupturas não pré-existentes no maciço, acarretando perdas. A vantagem em relação ao outro método que, da mesma maneira, pode ser aplicado no caso de bancadas altas (fatias horizontais com bancada alta) é a simplicidade e o menor número de etapas. O tombamento em fatias verticais pode ser integral ou fracionado (figura 3.11).

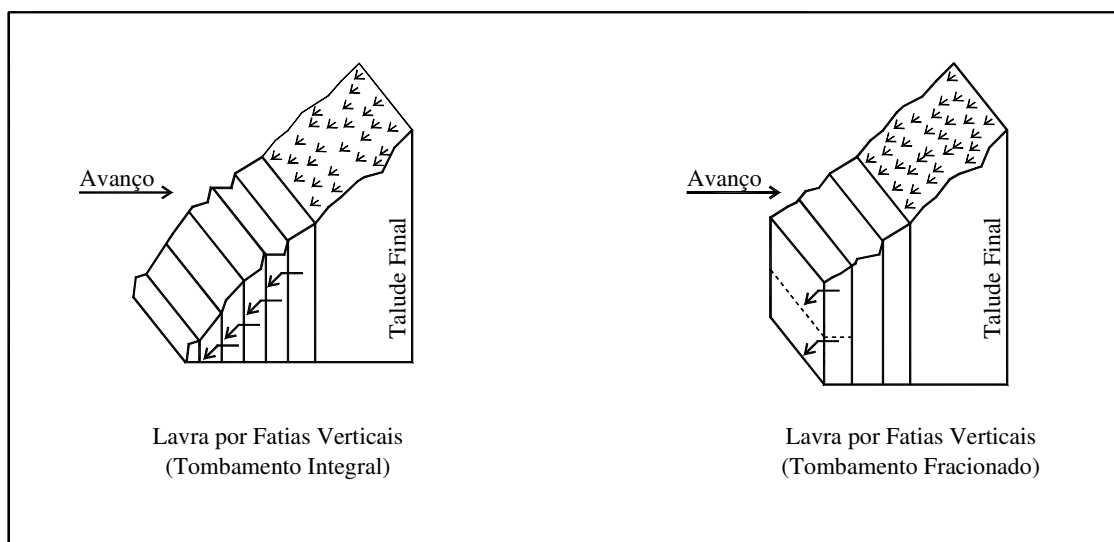


Figura 3-11 Lavra por fatias verticais.
Adaptado de Chiodi Filho (1995)

Além de todos esses tipos de lavra a céu aberto aplicados a rochas ornamentais, existem, no mundo, algumas empresas que extraem rochas ornamentais por lavra subterrânea. No Brasil, tem-se apenas um caso, na mina de Oliveira dos Brejinhos, na Bahia, de onde é extraído quartzito dumortierita, chamado de “Azul Imperial”. A lavra, nesse caso, evoluiu de lavra a céu aberto para lavra subterrânea (da Mata, 2003).

3.1.3 Técnicas de Corte

Durante todo o processo de lavra, os blocos precisam ser separados do maciço rochoso, bem como precisam ser cortados, reduzindo, assim, o tamanho dos mesmos para transporte (desdobramento do bloco primário) e para etapas posteriores de beneficiamento (esquadrejamento). Existem dois tipos básicos de corte: o corte contínuo e o corte em costura.

- **Corte Contínuo:**

O corte contínuo pode ser feito por meio de fios (helicoidal ou diamantado), correias ou discos. Podem ainda ser usadas técnicas de jato de chama e jato de água. Na figura 3.12 abaixo, vê-se um esquema de corte contínuo por fio diamantado.

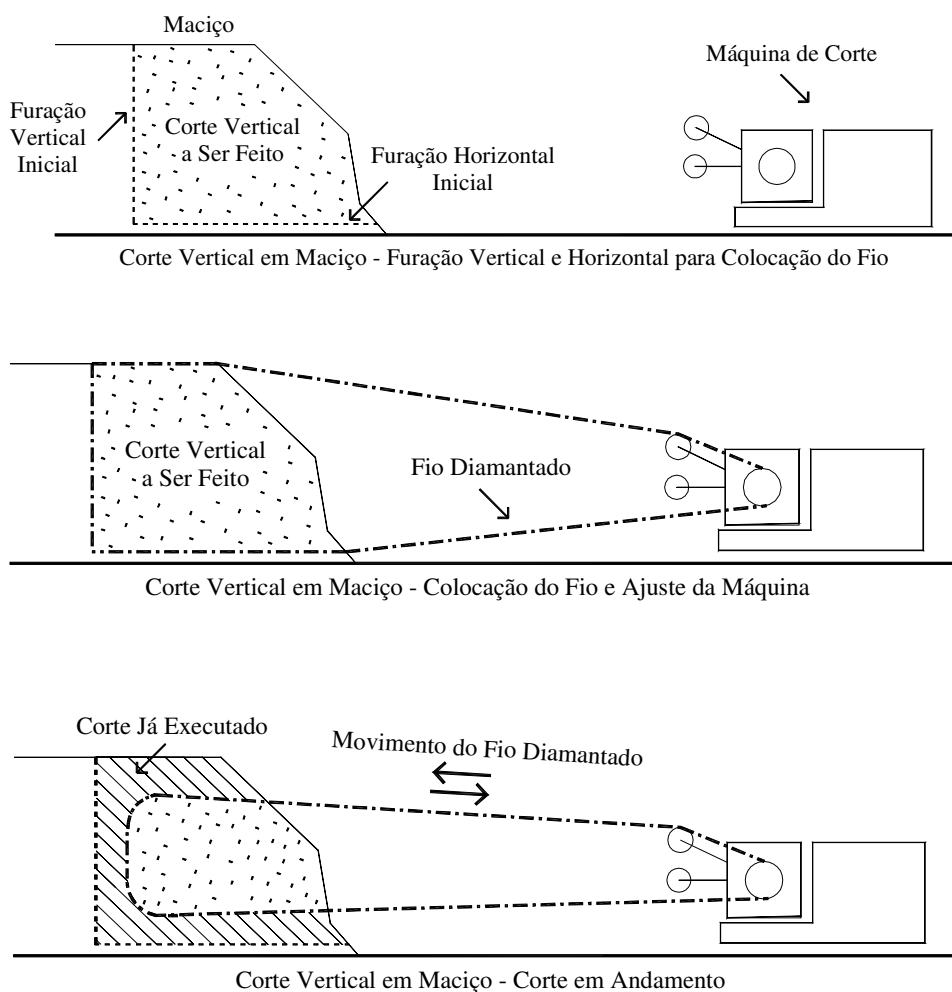


Figura 3-12 Esquema de corte de plano vertical em maciço por fio diamantado.

Na figura 3.13, vê-se uma foto de corte vertical com fio diamantado em maciço de esteatito (pedra sabão) extraído em Santa Rita de Ouro Preto (Almeida 2006).



Figura 3-13 Corte vertical com fio diamantado em maciço de esteatito (Almeida, 2006).

- ***Corte em Costura:***

O corte em costura baseia-se na execução de furos via marteletes ou hastes rotativas. Os furos podem ser adjacentes ou espaçados. Caso os furos sejam adjacentes, o processo é realizado em duas etapas, consistindo a primeira na execução de uma série de furos colineares, coincidentes com o plano de corte desejado, com espaçamento de valor próximo ao do diâmetro dos furos. Na segunda etapa, são promovidos furos intercalados aos primeiros, porém com diâmetro ligeiramente maior, obtendo-se, dessa forma, a ruptura completa da face e o destacamento do bloco do maciço rochoso.

Já a execução de furos espaçados é feita com espaçamento entre 20 e 40 cm correspondendo a um valor entre 8 e 10 vezes o diâmetro do furo. A furação não libera o bloco do maciço, apenas viabiliza a segunda etapa do processo que pode ser via explosivos, cunhas ou argamassa expansiva. Caso a furação seja para receber

explosivos, os mesmos serão aplicados em furos coplanares, paralelos, e com seu eixo dirigido segundo a face de corte desejada. O método pode ser aplicado na liberação de planos horizontais (fogo de levante) e no destacamento de planos verticais (fogo de avanço e lateral). A incidência média de furação é de 4 a 5 m/m².

Cunhas são peças metálicas inseridas no maciço ou no bloco em furos coplanares e paralelos. Quando inseridas, manual ou mecanicamente, induzem tensões na rocha gerando uma fratura ao longo da linha de furos. Almeida (2006) apresenta foto de aplicação de cunhas metálicas em corte feito em bloco de esteatito (figura 3.14).



Figura 3-14 Colocação de cunhas para corte em esteatito (Almeida, 2006).

Agentes expansivos são produtos químicos também inseridos em furos dispostos previamente executados de maneira a determinar o plano de corte, porém, ao contrário dos explosivos, não sofrem detonação, e sim auto-expansão química.

3.1.4 Beneficiamento

Depois de extraída a rocha ornamental (em bloco, como mármore e granitos ou em placa, nos casos dos quartzitos foliados e das ardósias) a mesma passa por etapas de beneficiamento (corte, esquadrejamento e polimento) visando adequar o produto da etapa de lavra às especificações de mercado.

No caso de rochas ornamentais extraídas em blocos, as etapas de beneficiamento não são executadas nas praças dentro da frente de lavra e sim em local específico com instalações e equipamentos apropriados, onde é feita a serragem do bloco em chapas por teares ou por talha-blocos e o posterior esquadrejamento e acabamento superficial das peças. Na figura 3.15, vê-se um tear multi-lâminas utilizado no corte de mármore (Coimbra Filho, 2006).



Figura 3-15 Tear multi-lâminas utilizado no corte de rochas ornamentais (Coimbra Filho, 2006).

Talha-blocos são equipamentos de serragem por discos diamantados que efetuam cortes em grande profundidade, utilizados para o corte do bloco em lajotas. Equipamentos similares utilizados para cortes mais rasos são os talha-chapas. Na figura 3.16, vê-se um talha-bloco monodisco, com disco diamantado de grande dimensão.



Figura 3-16 Talha-bloco monodisco com disco diamantado de grande dimensão (Coimbra Filho, 2006).

Nas rochas extraídas em placas, o material extraído já apresenta a forma planar. O acabamento e esquadreamento das peças são feitos ainda no local da extração, o que facilita a acomodação do material para transporte e faz com que o resíduo gerado nessa etapa fique próximo ao local de despejo e seja transportado para as pilhas junto com o resíduo gerado na frente de lavra (estéril). Na figura 3.17, são apresentadas etapas de beneficiamento de quartzito foliado (mais especificamente o deslocamento de lajões e ladrilhos) sendo realizadas próximo à rente de lavra.



Figura 3-17 Extração e corte de placas em quartzito foliado (Pires, 2007).

Após a extração, o transporte e a divisão dos blocos em chapas de tamanhos e espessuras determinadas, tem-se a etapa do acabamento superficial das chapas (o polimento). A figura 3.18 abaixo apresenta o polimento de chapas (Pires 2007).



Figura 3-18 Máquinas de polimento manual (esquerda) e automático (direita) usadas no beneficiamento do quartzito extraído em Ouro Preto (Pires, 2007).

3.1.5 Sistemas de Disposição de Rejeitos

Devido ao grande volume de resíduos gerados, tanto finos (em polpa), quanto de granulometria grosseira, os custos com operações de remoção, carregamento, transporte, espalhamento, confecção de taludes e controle de aterros ou de bacias de decantação têm sido cada vez mais altos para as empresas do setor. Outros fatores, como legislações ambientais específicas para preservação de nascentes e cursos de água, poluição atmosférica, áreas a serem preservadas pela beleza natural (como é o caso da serra da Canastra, São Tomé das Letras e Ouro Preto), além da valorização e urbanização de áreas próximas às pedreiras, têm feito com que muitos empreendimentos sejam desativados ou se mantenham em desacordo com a legislação ambiental. A possibilidade de se aplicar os resíduos gerados, como matéria-prima em outras indústrias, é vista como solução iminente para esse conjunto de problemas.

Os rejeitos gerados em extração de rochas ornamentais podem ser divididos em *finos* ($\# < 1,0\text{mm}$), normalmente dispostos em polpa, oriundos de serragem e polimento; e em *granulados* ($1,0\text{mm} < \# < 200\text{ mm}$), oriundos da etapa de lavra e deslocamento. É apresentada, na tabela 3.6, uma divisão básica dos resíduos gerados em extração de rochas ornamentais, suas origens e métodos de disposição.

Tabela 3-6 Tipos de disposição de resíduos gerados na exploração de rochas ornamentais

Granulometria	Origem	Disposição
Fina: $\# < 1,0\text{mm}$	Corte de blocos em teares ou talha-blocos	Polpa → Bacias de decantação
	Polimento de placas	
Média - Grosseira: $1,0\text{mm} < \# < 200\text{mm}$	Remoção de camada de estéril	Granulado → Pilhas
	Etapas de desmonte na lavra	
	Esquadrejamento de blocos	
	Extração, deslocamento, acerto e esquadrejamento de placas	

A figura 3.19 mostra taludes de rejeito de quartzito em uma mina em operação, alguns em pilhas recém-acabadas, alguns em processo inicial de vegetação e alguns com cobertura vegetal em estado avançado.



Figura 3-19 Taludes de depósito de rejeitos de quartzito – Alpinópolis.

A figura 3.20 mostra a disposição de fração fina (em polpa) de rejeito de polimento de placas de quartzito extraídas em pedreiras na cidade de Ouro Preto. Vê-se que, na figura da esquerda, o lançamento da polpa é feito logo acima da pilha de material de granulometria maior, sendo então direcionada diretamente ao curso de água a jusante (no caso o Ribeirão do Carmo), aumentando a turbidez e o assoreamento do mesmo. No caso da figura à direita, existe um tanque de decantação para retenção de finos (Pires, 2007).



Figura 3-20 Disposição desordenada (esquerda) e tanque de decantação de rejeitos finos em polpa provenientes de polimento de quartzito (direita) em Ouro Preto (Pires, 2007).

Deschamps et al (2002) acompanharam o processo de revegetação em taludes de rejeito de quartzito na serra da Canastra. Vêem-se, na figura 3.21, taludes reconstituídos em etapas diferentes de consolidação de revegetação.



Figura 3-21 Reconstituição de taludes de resíduo de quartzito em São Tomé das Letras (Deschamps et al, 2002).

Almeida (2006) analisou o método de lavra e o sistema produtivo artesanal de esteatito do distrito de Santa Rita de Ouro Preto. Identificou sérios problemas de disposição descontrolada de rejeito em encostas, como mostrado na figura 3.22.



Figura 3-22 Bota fora de lavra de esteatito (Almeida, 2006).

Segundo IBRAM (1992), de maneira geral, os objetivos ou metas de recuperação de áreas degradadas são:

- Em curto prazo:
 - recomposição da topografia do terreno;
 - controle da erosão do solo;
 - revegetação do solo;
 - correção dos níveis de fertilidade do solo;
 - amenização do impacto na paisagem;
 - controle da deposição de estéreis e rejeitos.

- Em médio prazo:
 - surgimento do processo de sucessão vegetal;
 - reestruturação das propriedades físicas e químicas do solo;
 - ocorrência de reciclagem dos nutrientes;
 - reaparecimento da fauna.

- Em longo prazo:
 - autossustentação do processo de recuperação;
 - interrelacionamento dinâmico entre solo, planta e animais;
 - utilização futura da área.

3.1.6 Reciclagem de Resíduos

3.1.6.1 Reciclagem de Resíduos de Rochas Ornamentais

Almeida et al (2001) analisaram a viabilidade de se aproveitarem resíduos de pedreira, gerados em Santo Antônio de Pádua, no estado do Rio de Janeiro, como agregado graúdo. Caracterizaram o resíduo em relação às fases minerais e chegaram à conclusão de que o mesmo enquadrava-se nas características dos materiais normalmente empregados como agregados. São constituídos, principalmente, por feldspato (62%), quartzo (25%), mica (7%) e hornblenda (5%). Através de caracterização petrográfica, concluíram que a rocha em questão é uma hornblenda-biotita-gnaiss com minerais fortemente orientados. A rocha deslaca com facilidade, tendo variedades locais conhecidas como “pedra olho de pombo”, “granito fino”, “granito pinta rosa” e “pedra madeira”.

Um limitador para a aplicação do resíduo gerado nas pedreiras em Santo Antônio de Pádua como agregado em concreto estrutural seria o valor do índice de *abrasão Los Angeles*, que indicou um material com resistência à abrasão inferior ao recomendado. Já o índice de forma do material indicou que o resíduo, quando britado, apresentou forma cúbica, o que é excelente para o uso em concreto. Segundo estimativa de custos dos autores, ao se montar uma planta de produção de agregados a partir dos resíduos gerados com capacidade de 30.000 m³/ano, recuperar-se-ia o investimento em quatro anos.

Dutra (2006) estudou a aplicação de rejeito de extração de granitos do sul do Brasil na indústria cerâmica, devido às altas concentrações de feldspato e quartzo. A quantidade de quartzo presente, bem como sua distribuição granulométrica, determinam os teores de SiO₂ e a fusibilidade dos concentrados.

As quantidades de feldspato determinam os teores relativos de K₂O, Na₂O e CaO, refletindo, significativamente, na fusibilidade dos produtos. Os minerais portadores de ferro, como a biotita, a hornblenda, os piroxênios e os anfibólios, apresentam suscetibilidade magnética significativa, permitindo a obtenção de concentrados com teores de Fe₂O₃ inferiores a 0,15% para os granitos de 0,31% para o sienito (variedade

de granito) e cor de queima branco. Nesse trabalho, foi estudada a rota apresentada na figura 3.23 abaixo.

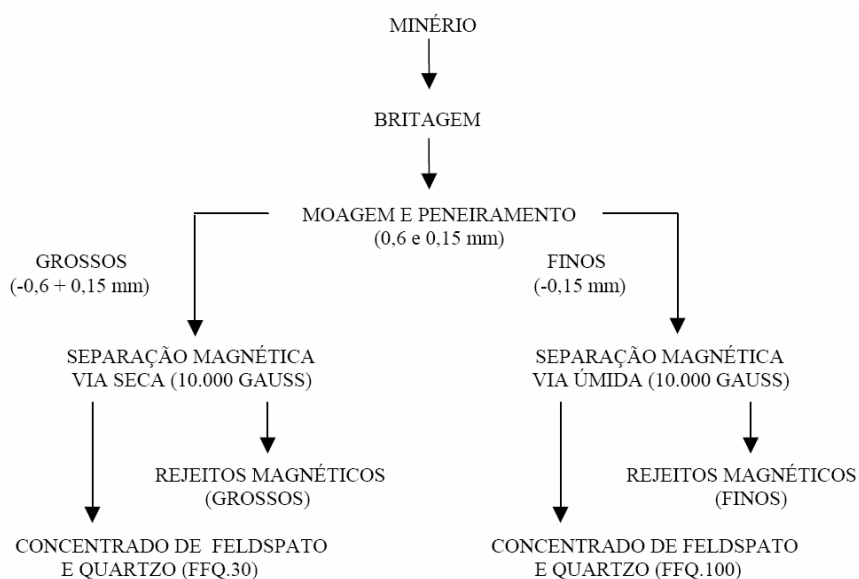


Figura 3-23 Fluxograma de ensaios de cominuição e concentração de rejeitos de granito para uso em indústria cerâmica (Dutra, 2006).

Vários grupos de pesquisadores estudaram a aplicação de resíduos de rochas ornamentais em materiais de construção. Pesquisadores do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense (Saboya Jr. et al, 2007; Xavier et al, 2009) e da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (Acchar et al, 2005; Acchar et al, 2006; Silva et al, 2005) estudaram a aplicação de rejeito de mármore e granito na produção de cerâmica vermelha. Os resultados foram satisfatórios tanto em termos de melhoria do processo, obtendo menores temperaturas de queima, como em termos de melhorias no produto final, alcançando, em alguns casos, propriedades mecânicas superiores.

Xavier et al (2009) concluíram que a adição de rejeito de granito (66% de partículas entre 0,002 e 0,06mm) em massas cerâmicas gera redução na absorção de água do produto, inclusive reduzindo perdas de resistência nas peças devido à degradação.

Acchar et al (2005) concluíram que rejeito de corte de granito, juntamente com óxido de manganês, promovem redução de temperatura de oxidação na produção de corpos de alumina e aumento na resistência mecânica do produto.

Acchar et al 2006 concluíram que adições até 50% de rejeito (em relação à massa total de matéria prima) de mármore e granito podem ser feitas em cerâmica vermelha sem prejudicar as características do produto. A presença dos rejeitos de mármore e granito na composição cerâmica melhorou as características do produto, diminuindo, inclusive, a temperatura de queima em relação a massas cerâmicas compostas exclusivamente de argila. Silva et al (2005) também verificaram melhoras na qualidade dos produtos cerâmicos com adição de rejeito de corte de mármore e granito.

Saboya Jr. et al (2007) estudaram a adição de rejeitos de mármore da região de Campos - RJ na produção de cerâmica vermelha. Baseados em seus resultados, recomenda-se uma adição de até 20% de rejeito, sendo o limite superior determinado pela absorção de água final dos tijolos cerâmicos.

Vieira et al (2004) estudaram a aplicação de rejeito de serragem de granito em cerâmica vermelha (telhas e tijolos) e tiveram as seguintes conclusões:

- promove melhoras no processo de extrusão aumentando a plasticidade da massa;
- promove melhoras na etapa de secagem devido ao decréscimo na água da mistura e menor retração linear;
- promove uma redução na porosidade do produto cerâmico, com conseqüente diminuição na absorção de água, sem diminuição de resistência.

Vieira et al (2008) estudaram a aplicação de rejeitos de extração de gnaisse (rocha ornamental) em substituição à de areia na produção de cerâmica vermelha. Os resultados indicaram que a utilização dos finos de gnaisse na mistura acarretou uma melhoria na trabalhabilidade/plasticidade da massa cerâmica e acarretou uma pequena redução na absorção de água das telhas. A resistência mecânica não se alterou, dentro da precisão estatística das medidas.

Pesquisadores da Universidade Federal de Campina Grande (Menezes et al, 2005; Menezes et al, 2008) estudaram a aplicação do resíduo de extração de caulim e de rochas graníticas do nordeste do Brasil, como produtos cerâmicos, e concluíram que ambos os resíduos podem ser adicionados em massas cerâmicas.

Pesquisadores da Universidade de Aveiro, em Portugal, estudaram a aplicação de resíduos da extração e corte de várias rochas ornamentais, inclusive quartzito, como cerâmica vermelha e porcelanato (Segadães et al, 2005; Torres et al, 2004; Torres et al, 2007 e Torres et al, 2009). Os resultados foram satisfatórios.

Souza e Mansur (2004) e Mansur et al (2006) estudaram a aplicação de resíduo de ardósia como insumo na indústria cerâmica, analisando a produção, a porosidade e a expansão térmica dos produtos. Concluíram que o rejeito de pó de ardósia pode ser usado como matéria prima em produção cerâmica com ou sem adição de outros materiais.

Silva e Peres (2006) estudaram a atividade pozolânica do rejeito de ardósia calcinada. Concluíram que, apesar de não haver atividade pozolânica na ardósia natural, essa atividade foi verificada (por método químico e via análise de resistência de argamassa) no caso de ardósia calcinada que apresentou, inclusive, baixa cristalinidade, especificação necessária para uso como material pozolânico.

Catarino et al (2003), após caracterizarem o rejeito de extração e corte de ardósia (50 a 60% de SiO₂, 20 a 25% de Al₂O₃ e diâmetro médio $d_{50} = 10,46\mu\text{m}$), fizeram testes de compressão, sinterização e resistência mecânica dos produtos obtidos através da sinterização. Esses ensaios foram feitos tanto em escala de bancada como em escala industrial. Os autores concluíram que a aplicação desse método em escala produtiva, além de reduzir o volume de rejeito lançado na natureza, resulta em um produto com propriedades físicas dentro dos limites necessários (Tabela 3.7).

Tabela 3-7 Propriedades de peças cerâmicas produzidas com rejeito de extração e corte de ardósia (Catarino et al, 2003)

Properties	Required	Laboratory tests	Industrial tests
Density (g cm ⁻³)	–	2.6	2.5
Shrinkage (%)	~8.5	8.1	9.6
Water absorption (%)	<0.5	0.02	0.05
Bend strength (MPa)	>27	75	52
Weibull modulus	–	14	5

Vieira et al (1999) estudaram a aplicação de rejeitos gerados na própria produção cerâmica, como insumos para produtos sinterizados, e concluíram ser possível o desenvolvimento de um produto à base desses resíduos altamente competitivo no mercado.

A tabela 3.8 a seguir mostra resumo dos grupos de pesquisadores citados neste trabalho que estudaram a aplicação de rejeitos de rochas ornamentais (mármore, granito, ardósia, quartzito, gnaisse e xisto) em diversas aplicações (cerâmica vermelha, porcelanato, adições pozolânicas, estruturas de pavimentos e agregados).

Tabela 3-8 Pesquisadores: Aplicação de resíduos de rochas ornamentais

Instituição		Pesquisadores	Resíduo	Aplicação
BR	UENF (Dept. Eng. Civil)	Alexandre J.	Mármore e granito	Produtos cerâmicos
		Xavier G.C.		
		Saboya Jr. F.		
		Outros		
BR	UENF (Dept. Materiais)	Holanda J.N.F.	Granito e gnaiss	Produtos cerâmicos
		Moreira J.M.S.		
		Vieira C.M.F.		
		Monteiro S.N.		
		Manhães J.P.V.T.		
		Outros		
BR	UFCG	Menezes R.R.	Granito	Produtos cerâmicos
		Neves G.A.		
		Ferreira H.C.		
		Outros		
BR	UFMG CPGEM	Peres A.E.C.	Ardósia	Produtos cerâmicos e adições pozolânicas
		Mansur H.		
		Silva M.E.M.C.		
		Souza L.P.F.		
		Outros		
BR	UFRGN / UFSC	Acchar W.	Mármore e granito	Produtos cerâmicos e alumina
		Hortza D.		
		Silva J. B.		
		Outros		
BR	USP	Alecrim A. V.	Quartzito	Estruturas de pavimentos
		Bernucci L. L. B.		
		Outros		
BR	CETEM / MCT	Almeida S. L. M.	Mármore, granito e granulito	Produtos cerâmicos e agregados
		Chaves A. P.		
		Leal Filho L. S.		
		Outros		
BR	FESP / UEMG	Ramirio F. R.	Quartzito	Agregados
		Franklin Jr. I.		
		Collares E. G.		
		Outros		
PT	Aveiro	Ferreira J.M.F.	Quartzito, granito e mármore	Produtos cerâmicos
		Torres P.		
		Tulyaganov D.U.		
		Segadães A.M.		
		Labrincha J.A.		
		Raupp Pereira F.		
Outros				
PT	Coimbra	Catarino L.	Ardósia e xisto	Produtos cerâmicos
		Vieira M.T.		
		Vieira S.C.		
		Outros		

3.1.6.2 Reciclagem de Resíduos de Quartzito

Franklin Júnior (2009) estudou materiais depositados como rejeito nos bota-foras de minerações de quartzito para uso em concretos, verificando a possibilidade de este material ser aproveitado na indústria da construção civil. O autor fez a amostragem, apreciação petrográfica e caracterização tecnológica das amostras para depois analisar os agregados em concreto. Os resultados de caracterização tecnológica nas amostras de quartzitos e da análise de concreto produzido com o agregado foram satisfatórios, com ressalvas às formas lamelares das partículas britadas em britador de mandíbula e da potencialidade deletéria dos concretos com quartzito, identificada nos ensaios para verificação de reação álcali-agregados.

Ramírio et al (2008) desenvolveram um estudo comparativo entre as propriedades físicas de amostras de rejeitos de quartzito de quatro frentes de lavra e de agregados graúdos de uso consagrado no mercado. Os resultados são mostrados na tabela 3.9.

Tabela 3-9 Caracterização de rejeito de quartzito como agregado graúdo (Ramírio et al, 2008)

TIPO LITOLÓGICO	DIABÁSIO	GNAISSE	CALCÁRIO	QUARTZITO			
AMOSTRA	Brita 1	Brita 1	Brita 1	1	2	3	4
GRANULOMETRIA (Diâmetro Máximo)	19 A	19 A	25 N/E	19 A	19 A	19 A	19 A
FORMA (IPT M-49)	CÚBICA A	CÚBICA A	CÚBICA A	CÚBICA A	CÚBICA A	LAMELAR R *	CÚBICA A
MASSA ESPECÍFICA (g/cm ³)	2,88 B	2,79 B	2,76 B	2,63 B	2,64 B	2,59 B	2,62 B
MASSA ESPECÍFICA CONDIÇÃO S S S (g/cm ³)	2,9 B	2,79 B	2,77 B	2,64 B	2,65 B	2,61 B	2,63 B
ABSORÇÃO (%)	0,89 B	0,2 E	0,4 E	0,4 B	0,2 B	0,9 B	0,5 B
POROSIDADE (%)	2,6 B	0,5 E	1,2 E	1,0 E	0,6 E	2,3 B	1,3 E
MATERIAIS PULVERULENTOS (%)	0,48 E	0,34 E	0,42 E	0,57 E	0,56 E	1,36 A*	0,54 E
ABRASÃO (%)	23 E	26 E	21 E	33 E	25 E	45 B	29 E
ESMAGAMENTO (%)	17 E	20 B	17 E	22 B	18 E	25 B	19 E

E – excelente, B – bom, A - aceitável, R* - rejeitado, N/E – não enquadra.

Deschamps et al (2002) apresentaram resultados de aplicação de fração fina de rejeito de quartzito ($\# < 0,5\text{mm}$) como agregado utilizado em blocos de sílica-cal (mistura de 90% de areia silicosa com 10% de cal e água submetida à pressão e temperatura controladas em altoclave). Os blocos produzidos apresentaram valores de resistências à compressão maiores que 20 N/mm^2 (20 Mpa) (Figura 3.24).

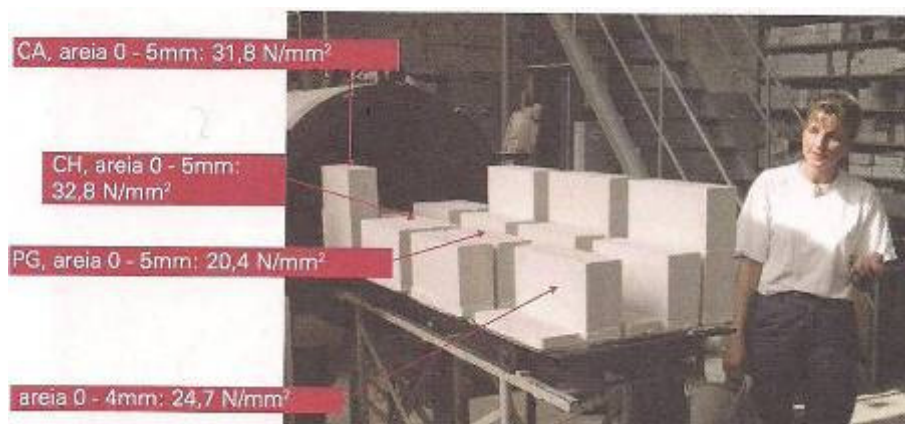


Figura 3-24 Confeção de tijolos de sílica-cal com rejeito de quartzito (Deschamps et al, 2002).

Os resíduos utilizados na produção de blocos sílica-cal apresentados por Deschamps et al (2002) foram obtidos na planta de britagem e classificação mostrada na figura 3.25 abaixo.



Figura 3-25 Planta de britagem de rejeito de quartzito – São Tomé das Letras (Deschamps et al, 2002).

A Agência Goiana de Desenvolvimento Industrial e Mineral do estado de Goiás (AGIM) desenvolveu um trabalho na cidade de Pirenópolis – GO, com o objetivo de estudar o aproveitamento de rejeito de extração de quartzito foliado. A deposição do resíduo em áreas a serem lavradas com aberturas de cavas, o assoreamento do rio das Almas e o impacto visual foram os principais fatores negativos identificados. A tabela 3.10 mostra as etapas do projeto (AGIM, 2002).

Tabela 3-10 Trabalhos realizados de recuperação de rejeitos de quartzito na cidade de Pirenópolis (AGIM, 2002)

TRABALHOS REALIZADOS	PRODUTOS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Topografia de Detalhe, malha 50 x 50 m, mais irradiação, mais georreferenciamento. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mapa base-planialtimétrico, escala 1:1.000, georreferenciado. ▪ Cadastramento de frentes de lavra (pias). ▪ Mapeamento plani-altimétrico dos depósitos de rejeitos. ▪ Cubagem dos rejeitos (resíduos).
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Caracterização dos Rejeitos Granulados 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Definição de 4 tipos de resíduos de quartzitos
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Amostragem e Transporte. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Disponibilização de 1 amostra de cada tipo, de cerca de 8 toneladas cada, no Centro de Tecnologia Mineral da AGIM, em Goiânia.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estudo das Curvas Características do Britador. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Determinação da abertura ideal da mandíbula do britador.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ensaio de Britagem em Circuito Fechado e Regime Semi-contínuo. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Produtos Finais 1.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Caracterização Física. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Caracterização Tecnológica dos Produtos.
Estudos de Disposição de Rejeitos.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Planejamento da Disposição dos Rejeitos Granulados.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estudos de Controle Ambiental dos Rejeitos Granulados. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Propostas para Controle Ambiental

3.2 Quartzito como Rocha Ornamental

Minas Gerais apresenta uma grande reserva de quartzito a ser lavrado. De acordo com o Anuário Mineral 2006 (DNPM, 2006), Minas Gerais tem 446.424.975 m³ de reservas medidas de quartzito ornamental. Grande parte dessa reserva está na região da Serra da Canastra, nos municípios de Alpinópolis, Capitólio, Sacramento e São João Batista da Glória. Os valores das reservas medidas, indicadas, inferidas e lavráveis, bem como as cidades produtoras são indicadas na tabela 3.11.

Tabela 3-11 Reservas de quartzito ornamental em Minas Gerais (DNPM, 2006)

UNIDADES DA FEDERAÇÃO/ MUNICÍPIOS	RESERVAS (1)			
	Medida (m ³)	Indicada (m ³)	Inferida (m ³)	Lavrável (m ³)
MINAS GERAIS	446.424.975 m³	524.421.292 m³	381.275.891 m³	789.389.006 m³
Alpinópolis	26.433.689	23.051.363	58.719.140	26.433.689
Capitólio	5.517.794	6.180.902	34.100.201	5.517.794
Carmo do Rio Claro	105.734.000	-	-	105.734.000
Guapé	144.273.823	423.855.275	209.341.400	501.940.245
Luminárias	11.572.987	4.822.848	-	11.572.987
Mariana	1.815.615	2.204.763	2.925.972	1.817.330
Muriae	7.999	17.964	-	7.999
Piui	27.399.767	3.600.000	5.600	27.399.767
Sacramento	22.290.000	-	-	22.290.000
São João Batista do Glória	14.785.625	4.378.012	9.863.750	14.785.625
São José da Barra	1.213.947	2.852.073	4.682.066	1.213.947
São José do Goiabal	3.189.766	14.179.335	17.369.101	3.473.820
São Thomé das Letras	82.189.963	39.278.757	44.268.661	67.201.803

Segundo Costa et al (2001), os quartzitos com alto grau de recristalização e granulação predominantemente fina, quando constituídos essencialmente por quartzo, mostram textura granoblástica e podem apresentar propriedades típicas dos chamados granitos comerciais. Nesse caso, a extração será a partir de blocos, sendo possível a obtenção de chapas regulares em teares, com posterior polimento e lustro.

Em função da presença de determinados minerais acessórios, como a dumortierita ou a cianita, ou ainda de minerais opacos alterados, os maciços de quartzito podem apresentar foliação até muito bem desenvolvida seguindo a disposição preferencial desses filossilicatos, não permitindo a extração de blocos e nem o corte regular de chapas, e sim, a extração em placas. A foliação é determinante no método de lavra, sendo, a partir dessa foliação que se deslaca o material já em forma de lajões, e não mais em forma de blocos como no caso dos quartzitos com alto grau de recristalização.

Tem-se, nesse caso, a extração de *quartzito foliado*, a modalidade de extração de quartzito mais importante em Minas Gerais, e também com maior geração de resíduos por m² de produto.

Normalmente, verifica-se uma total falta de padrão e de regularidade nas áreas de extração de quartzito foliado. Nesses casos, a falta de regularidade dos níveis, aliada aos métodos não adequados de extração, determinam grandes perdas e baixas taxas de aproveitamento para esses materiais. Quando o quartzito extraído é foliado, utiliza-se a foliação do mesmo no momento do deslocamento.

O quartzito em placas pode ser usado como revestimento horizontal ou vertical (piso e revestimento de paredes e muros) e é aplicado, na maioria das vezes, sem polimento. No entanto pode ser polido. Quando não é polido, oferece superfície áspera como opção antiderrapante e fria (reduz temperaturas em interiores e absorve pouco calor se exposto a raios solares tornando-o ideal para entorno de piscinas); além disso, apresenta visual rústico, trabalhabilidade e alta resistência à compressão. As placas de quartzito podem ser em forma de ladrilhos (retangulares) serrados, almofadados ou cortados à mão e ainda em forma de lajotas irregulares.

Além de ladrilhos e lajotas, os revestimentos podem ser feitos pela justaposição de peças menores ou em forma de paralelepípedo chamadas filetes (peças de aproximadamente 10x5x2cm usadas em revestimentos verticais) ou cubos (peças de aproximadamente 10x10x5cm usadas em pisos). Além de pisos e paredes, o quartzito tem sido usado em revestimento de elementos estruturais (pilares e vigas), bancadas, degraus, soleiras, etc. As variações de utilização do quartzito como revestimentos são apresentadas por Pires (2007), na figura 3.26.

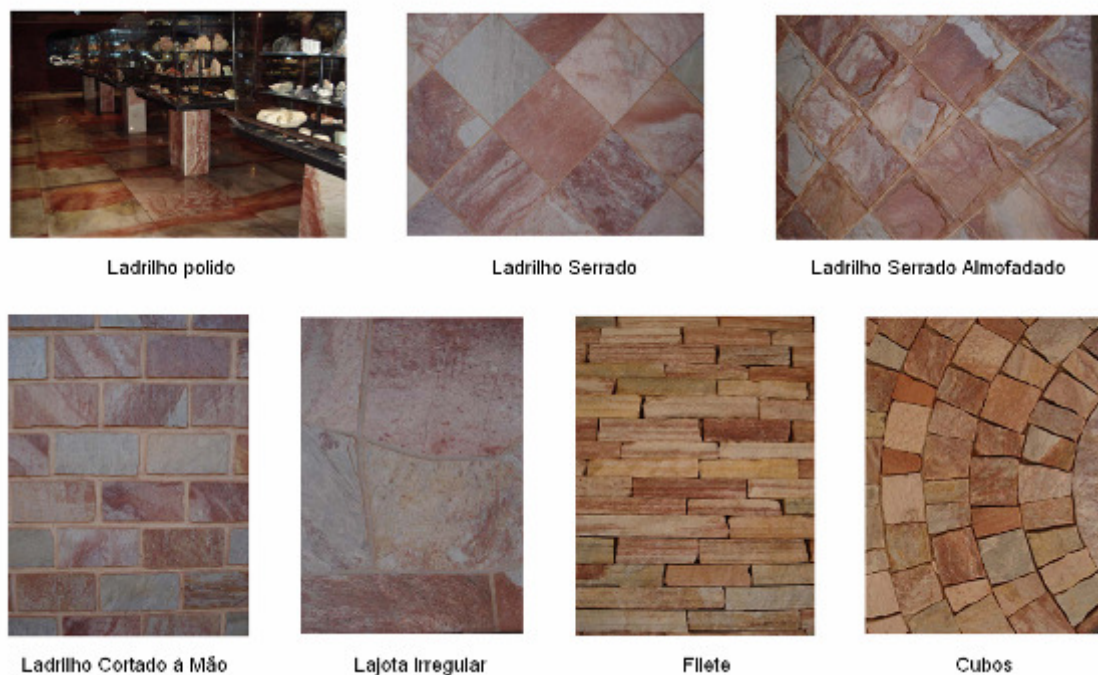


Figura 3-26 Utilização do quartzito como material de acabamento (Pires, 2007).

Além da aplicação como revestimento (aplicação que gera maioria da demanda atual pelo produto), o quartzito foi usado, no período da colonização em Minas Gerais, como insumo na produção de verdadeiras obras de arte, em sua maioria com aplicações diretas na arquitetura da época. Essa arte é chamada de Cantaria.

Segundo Pereira (2007), a técnica da cantaria consiste em lavrar a rocha em formas geométricas ou figurativas para aplicação em construções, com finalidade ornamental e / ou estrutural.

Em Minas Gerais, a cantaria foi implantada por influência de pedreiros e canteiros portugueses, adquirindo peculiaridades graças ao uso das rochas locais e à criatividade dos mestres e oficiais. Por ser onerosa, a cantaria no século XVIII teve desenvolvimento nas vilas e cidades ligadas às riquezas do período do ciclo do ouro. Dentre essas cidades, Ouro Preto se destaca pela quantidade e qualidade de suas obras (Pereira, 2007). A figura 3.27 a seguir mostra restauração de peça em cantaria.



Figura 3-27 Restauração de umbrais e verga em cantaria (Pereira, 2007).

A cantaria, como arte, está presente nas construções antigas tanto em funções de acabamento (degraus, peitoris, etc), bem como em funções estruturais.

Segundo Mendes e Jordt-Evangelista (1998), no Estado de Minas Gerais, a região de Ouro Preto foi a primeira a utilizar rochas ornamentais (quartzito e pedra sabão) nas construções que ainda hoje podem ser visitadas no centro histórico. O quartzito da região do Itacolomi, maciço e de granulação grossa, foi muito utilizado com função estrutural e na confecção de peças como vergas, soleiras e umbrais, enquanto o quartzito da região de São Bartolomeu, que apresentava uma xistosidade muito proeminente permitindo a extração já na forma de placas, era aplicado como revestimento para pisos e paredes das construções (função de revestimento).

A tabela 3.12, abaixo, resume as aplicações do quartzito na construção civil, como revestimento ou como peças de cantaria.

Tabela 3-12 Aplicações de quartzito na construção civil e como artesanato

<i>Aplicação</i>	<i>Peça</i>
Revestimento - Construção Civil	Ladrilhos polidos
	Ladrilhos serrados
	Ladrilhos almofadados
	Ladrilhos cortados à mão
	Lajotas irregulares
	Filetes
	Cubos
Cantaria - Construção Civil	Pilares de canto
	Peças para vãos em arco
	Peças para muro
	Lajões
	Umbrais (ou ombreiras)
	Vergas
	Contravergas
	Peitoris
	Soleiras
	Degraus
Cantaria - Artesanato	Chafarizes
	Estátuas
	Carrancas
	Cruzes
	Pelourinhos

Além da aplicação do quartzito, mantendo-se as características da rocha (revestimento na construção civil ou cantaria), tem-se também a exploração do mesmo com o objetivo exclusivo de se empregá-lo como fonte de quartzo para diversas finalidades, que podem ser (Barbosa 1995):

- areia para vidro e fundição;
- sílica pulverizada e quartzo cultivado;
- carbetos de silício, ferrosilício e silício metálico;
- tijolo refratário e fluxo metálico;
- silicato de sódio;
- eletrodos e osciladores de frequência;
- tintas.

3.3 Extração de Quartzito

Segundo Gomes (2000), nas pedreiras, em torno da cidade de São Tomé das Letras, é extraído um quartzito micáceo, geralmente com aspecto laminado, causado por uma xistosidade bem desenvolvida. As faixas de quartzito pertencem à formação São Tomé das Letras, integrante do grupo Carrancas. A formação é ainda caracterizada pela presença de minerais metálicos, como magnetita, titano-magnetita, ilmenita e rutilo. A turmalina ocorre como mineral acessório típico.

Segundo Fernandes et al (2003), no município de São Tomé das Letras, afloram quartzitos de coloração predominantemente esbranquiçada, amarela e rosada, designados comercialmente de pedra São Tomé Branco, Amarelo e Róseo. Já os quartzitos da região de Luminárias caracterizam-se por apresentarem coloração predominantemente esverdeada com presença de manchas avermelhadas, uma variação mineralógica de 65 a 85% de quartzo e 20 a 25% de muscovita. A estrutura foliada/laminada é proeminente nas duas regiões.

Deschamps et al (2002) identificaram na região de São Tomé das Letras o lançamento de estéril nas vertentes e nos cursos de água, provocando carreamento dos resíduos de quartzito por ação das águas pluviais, o que causa assoreamento das drenagens, ou mesmo, a sua obstrução. Os autores identificaram também a deposição de resíduos ao redor das cavas, o que impede o avanço das frentes de lavra.

Campos e Silva (2003) identificaram vários problemas que geram baixa produtividade na extração de quartzito de Pirenópolis (Goiás). Um exemplo citado é a disposição do rejeito gerado por sobre o maciço rochoso que ainda será explorado (Figura 3.28).

Lima et al (2005) estudaram a questão dos rejeitos de extração de quartzito na serra do Taquaral, entre Ouro Preto e Mariana. A figura 3.29 mostra o impacto ambiental gerado.



Figura 3-28 Resíduos acima de maciço rochoso a ser explotado – Pirenópolis (GO) (Campos et al, 2003).



Figura 3-29 Impacto ambiental devido à extração de quartzito em encosta na região de Ouro Preto (Lima et al, 2005).

Lima et al (2007) caracterizaram os rejeitos do quartzito extraídos na serra do Taquaral, entre Ouro Preto e Mariana. A seguir são apresentados resultados da análise da composição mineralógica (tabela 3.13), composição química (tabela 3.14) e distribuição granulométrica de amostras (figura 3.30).

Tabela 3-13 Composição mineralógica de amostra de rejeito de quartzito gerado em exploração na serra do Taquaral – Ouro Preto (Lima et al, 2007)

Minerais Identificados	Porcentagem
Quartzo	85%
Micas (moscovita e cianita)	10%
Sericita	5%
Minerais Opacos (rutilo, zircão, hematita, goethita, calcopirita e prata)	2%

Tabela 3-14 Análise química de amostra de rejeito de quartzito gerado em exploração na serra do Taquaral – Ouro Preto (Lima et al, 2007)

Tamanho mm	Elementos Maiores (%)										Elementos Menores (ppm)			
	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Li ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	SiO ₂	Ti ₂ O	Co	Cr	Pb	Zr
3,36	3,7	<0,01	0,35	0,22	<0,01	0,01	<0,01	0,04	91,1	0,22	222,5	38,8	<5,0	75,2
1,41	6,3	0,01	1,70	0,36	<0,01	0,02	<0,01	0,09	86,3	0,31	313,8	51,7	32,7	122,4
1,68	6,1	0,03	1,38	0,29	<0,01	0,02	<0,01	0,08	85,9	0,28	246,4	39,9	<5,0	111,5
0,589	5,6	0,05	0,74	0,22	<0,01	0,02	<0,01	0,08	86,3	0,24	223,9	32,8	9,3	92,6
0,417	6,6	0,04	0,39	0,18	<0,01	0,01	<0,01	0,07	86,2	0,20	286,2	31,9	26,5	79,8
0,295	4,5	0,03	0,27	0,14	<0,01	0,01	<0,01	0,05	87,5	0,15	211,0	21,7	<5,0	63,3
0,208	4,1	0,01	0,11	0,08	<0,01	0,01	<0,01	0,03	93,6	0,10	378,7	18,0	13,9	48,8
0,147	2,4	0,01	0,08	0,05	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	91,2	0,08	347,9	11,1	<5,0	36,6
0,104	1,9	0,01	0,09	0,04	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	94,3	0,08	303,2	9,2	<5,0	33,2
0,074	3,0	0,01	0,14	0,07	<0,01	0,01	<0,01	0,02	91,1	0,15	311,7	15,8	<5,0	43,7
0,038	5,7	0,01	0,25	0,21	<0,01	0,01	<0,01	0,05	85,4	0,34	289,9	33,3	<5,0	88,0
-0,038	17,5	0,05	1,24	1,41	<0,01	0,06	<0,01	0,30	63,6	1,11	86,0	116,9	55,9	406,1

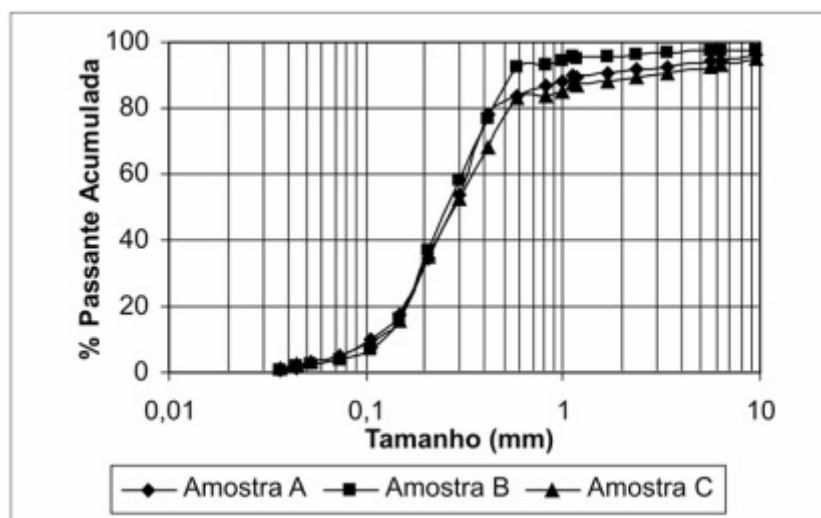


Figura 3-30 Distribuição granulométrica de amostras de rejeito de quartzito gerado em extração na serra do Taquaral – Ouro Preto (Lima et al, 2007).

Segundo Deschamps et al (2002), a extração de quartzito em São Tomé das Letras é feita com lavra a céu aberto, em bancadas, sendo retirado inicialmente o material estéril, composto pelo capeamento e quartzito alterado para depois atingir o material de interesse. Quando essa fase inicial de remoção de estéril é feita por meio mecânico, pode-se aproveitar parte do material como minério, em torno de 10%. Porém, quando se utilizam explosivos (fogo de limpeza), não há aproveitamento sendo todo o material gerado enquadrado como estéril. Na sequência, atinge-se a camada de minério e ainda por meio de explosivos (fogo de corte) procede-se à liberação do banco para que o minério seja deslocado. Nessa etapa, há perdas ao longo de uma faixa com largura de 0,80m nas faces do banco em contato com o maciço rochoso, que são blocos fragmentados e retalhos de quartzito não comercializáveis. A disposição dos rejeitos gerados nas mineradoras em São Tomé das Letras é feita em taludes com geometria similar, cuja técnica foi difundida pelos donos das empresas (Figura 3.31). Vê-se que existe uma preocupação em se travar o pé da pilha em uma trincheira escavada no solo, ou mesmo em alguma cava exaurida, como mostrado na figura.

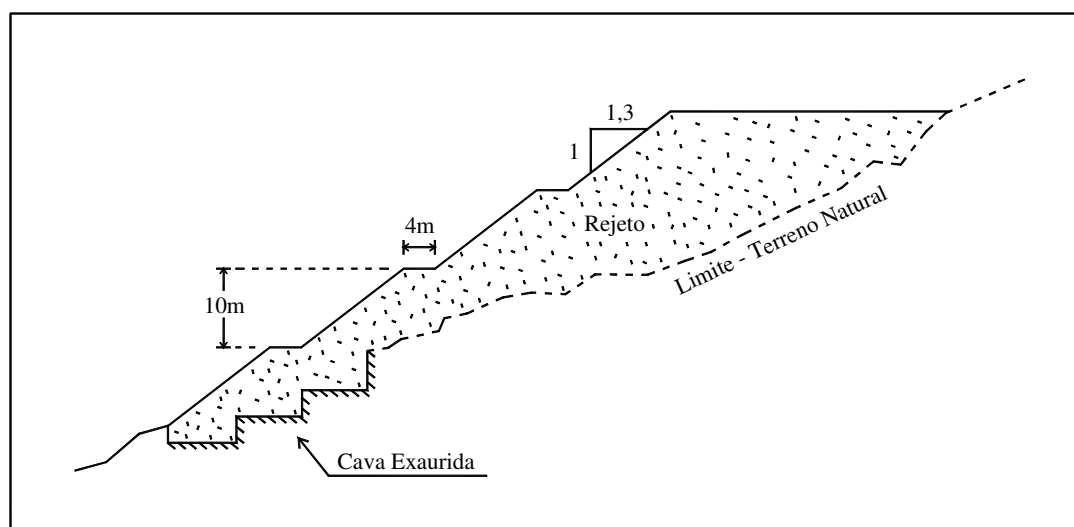


Figura 3-31 Esquema de disposição controlada com uso de bermas (adaptado de Deschamps et al, 2002).

Segundo Gomes (2000), no município de São Tomé das Letras, o método de lavra nas empresas que extraem quartzito é a céu aberto, com uma tendência ao aprofundamento em “cava”. Há lavras sendo executadas em bancadas únicas variáveis (de 2 a 25 metros de altura) ou bancadas sucessivas variáveis (até 15 metros de altura). As bancadas não apresentam uma geometria regular, sendo difícil a quantificação exata de parâmetros

importantes que irão influir no desmonte. As operações de lavra são iniciadas pela escolha e preparação do local a ser lavrado com abertura de acesso, mesmo que precário, além da remoção da vegetação. Não existe planejamento prévio das operações de lavra, como também não existe pesquisa geológica adequada. As atividades de lavra são desordenadas e dadas à sorte.

Gomes (2000) ressalta ainda que, no caso de São Tomé das Letras, o primeiro nível é aberto através de ciclos sucessivos de perfuração e desmonte com explosivos. Os furos de mina são feitos por perfuratrizes pneumáticas manuais alimentadas por compressores portáteis a diesel. Não há nenhum controle sobre a velocidade de perfuração na rocha. A quantidade de explosivos, bem como o tipo a ser utilizado, variam de pedreira para pedreira. Uma observação geral mostra que os explosivos utilizados são o industrial ou de fabricação local à base de nitrato e explosivos à base de nitroglicerina. A razão de carga varia caso o objetivo seja fragmentar o estéril ou “serrar” a bancada para retirar o minério (foliado). Logo o material desmontado tem dois destinos conforme sua classificação, estéril ou minério. O estéril é geralmente carregado por uma pá-carregadeira de pneus e transportado por caminhão basculante até as pilhas de estéril, onde é usualmente depositado em “ponta de aterro”, na crista do talude da pilha. O minério segue o processo de deslocamento, esquadrejamento, risco e corte, executados manualmente na própria frente de lavra.

Valadão et al (2010), durante realização de levantamento de produtores de quartzito na região da serra da Canastra, constataram a variada escala de produção existente na região. Há desde minerações com dezenas de empregados até frentes de lavra desenvolvidas por poucas pessoas. Notam-se desde atividade de lavra bastante mecanizada com alguma técnica convencional de mineração até as atividades quase que exclusivamente manuais, constituindo uma lavra de garimpo.

Quanto aos aspectos ligados à geologia, verifica-se que os trabalhos de lavra não são planejados a partir de um estudo da geologia local e também não é utilizada a geologia de mina para o detalhamento do conhecimento do depósito.

O método de lavra utilizado é a lavra a céu aberto em bancadas. Como não existe planejamento de lavra, as operações não seguem um sequenciamento pré-determinado,

gerando irregularidade na produção. As bancadas utilizadas para o desmonte do capeamento normalmente são altas, podendo alcançar mais de 20 metros; e para a extração do bem mineral útil (placas de quartzito foliado) utilizam-se bancadas baixas não ultrapassando poucos metros, devido à operação de extração de placas ser manual. Quando o capeamento é removido, inicia-se o corte do quartzito para a produção de chapas; o desmonte é feito também por explosivos somente com a finalidade de cortar a rocha. Em seguida, utilizam-se cunhas para deslocar e deslocar os blocos gerados pelo corte.

A falta de planejamento e controle nas operações de desmonte com explosivos, além de promover o corte do bloco para sua liberação do maciço, pode provocar fraturas nos blocos, diminuindo a recuperação e induzindo tensões. Um exemplo de frente de lavra nessas condições é mostrado na figura 3.32.



Figura 3-32 Lavra em bancada executada em mineradora na serra da Canastra (Valadão et al, 2010).

A lavra de bancada para exploração de quartzito foliado não apresenta as bancadas com geometria bem definida como na exploração de rochas ornamentais extraída em blocos.

A falta de regularidade na topografia da frente de lavra não se torna um grande empecilho devido ao fato de não se necessitar de equipamentos pesados nas bancadas, pois não são extraídos blocos, e sim chapas.

As vias de acesso também ficam prejudicadas, pois o foliamento dos taludes favorece deslizamento de material a montante e a jusante das estradas, provocando barreiras ou falhas, além de gerar uma grande quantidade de material solto, o que causa aumento de riscos de acidentes e de consumo de pneus.

A figura 3.33 abaixo mostra uma frente de lavra de maior porte de quartzito foliado. Nota-se que os acessos às bancadas, na maioria das vezes, são feitos com aterros utilizando rejeitos oriundos do processo de lavra. Observa-se no meio da cava um acesso principal, onde foi construída inclusive uma berma intermediária para estabilização (CPRM, 2007).



Figura 3-33 Frente de lavra de grande porte para extração de quartzito foliado na região de Alpinópolis (CPRM, 2007).

Ainda segundo Valadão et al (2010), para as rochas ornamentais, a determinação do padrão de amostragem é bastante difícil, pois a detecção de aspectos visuais, necessários para a caracterização das rochas ornamentais, através de amostras de pequeno volume e bastante espaçadas, é muito difícil. Uma alternativa viável a um programa de obtenção de amostras é a realização da lavra experimental durante a pesquisa, obtendo-se, assim, um melhor conhecimento das características da rocha pelo fato de utilizar volumes maiores no estudo. Quando bem justificada, a lavra experimental é permitida durante a pesquisa mineral, podendo o produto, inclusive, ser comercializado com o objetivo de cobrir os custos. A lavra experimental deve ser uma etapa da pesquisa mineral; e não uma justificativa para se iniciar uma lavra sem devidos estudos. De todas as áreas de extração visitadas pelo autor em seu trabalho, não foi observado em nenhuma delas algum tipo de planejamento de lavra baseado em critérios de engenharia. A extração de placas na frente de lavra é mostrada na figura 3.34.



Figura 3-34 Remoção das placas em lavra de mineradora na serra da Canastra (Valadão et al, 2010).

Tendo em vista a grande quantidade de informações já obtidas com os processos de extração e a possibilidade de realização de geologia de mina nessas áreas, é plenamente viável a elaboração de um planejamento de lavra para uma definição dos limites de extração. Na tabela 3.15 abaixo, apresentam-se as propostas de Valadão et al (2010) para promover melhoria na produção (qualidade e quantidade de produto) e menor geração de resíduos nas minerações de quartzito da região da serra da Canastra.

Tabela 3-15 Propostas para melhoria do processo extrativo de quartzito na serra da Canastra (adaptado de Valadão et al, 2010)

Etapa	Proposta	Justificativa
Pesquisa Mineral	Levantamento geológico de detalhe.	Permite amostragem, análise de variabilidade do bem mineral no depósito e execução sistemática das quatro fases que compõem a mineração (prospecção, exploração, desenvolvimento e lavra).
Desenvolvimento	Evitar deposição de estéril na própria cava.	Esta deposição gera incremento no custo de operação devido à retomada do material e interferência no sequenciamento de lavra.
	Projetar praças de trabalho e acessos obedecendo a critérios técnicos de engenharia para o dimensionamento de seus aspectos mais importantes como rampas, raios de curva, larguras, drenagem, etc.	Um sistema otimizado diminuiria o tempo de ciclo e aumentaria a via útil de equipamentos e componentes, acarretando aumento na produção e diminuição no custo de operação.
Lavra	Alteração no plano de fogo tanto para desmonte do capeamento quanto para corte do quartzito.	Reduções na razão de carregamento diminuem indução de tensões no maciço.
	Sequenciamento de detonação.	Minimizaria vibrações que diminuem a recuperação na lavra por concentrar elevadas tensões no pacote de rocha.
	Realização de testes com carrinho de piso com disco diamantado e cunhas hidráulicas para o corte do pacote de rocha.	A utilização de explosivo para o corte do quartzito faz diminuir consideravelmente a recuperação da rocha aproveitável.
	Realização de testes com rompedores hidráulicos numa primeira etapa para a rocha mais branda do capeamento.	Evitar detonação do capeamento.
	Utilização de lavra ascendente.	Sendo a camada de quartzito inclinada, nas frentes de lavra conduzidas descendente-mente, movimentam-se as placas cortadas contra a gravidade e o pacote de rochas fica “preso”, provocando fraturas na rocha como consequência do uso de explosivos.
Beneficiamento	Transferência das operações de preparação da chapa para um galpão próximo da cava deixando na cava somente as operações de extração do quartzito.	Os trabalhos atualmente são feitos ao sol, com as placas trabalhadas diretamente no piso. Haveria melhora de produtividade e otimização de pilhas.

3.4 Agregado para a Construção Civil

Segundo a ABNT NBR 9935 / 2005 (Agregados – Terminologia), “agregado é um material granular, geralmente inerte com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa e concreto”.

As principais aplicações dos agregados são em concreto e argamassas. No entanto são ainda utilizados em bases para pavimentação, lastro de vias férreas, elemento filtrante, etc.

Os agregados são materiais granulares, de dimensões e propriedades adequadas para uso em obras de engenharia civil. Podem ser classificados levando-se em conta a densidade, o tamanho e a origem.

Com relação à densidade, existem agregados leves (pedra-pomes, vermiculita, etc.); agregados normais (brita, areia, cascalho, etc.); agregados pesados (barita, magnetita, etc.). Com relação ao tamanho, existem agregados miúdos (areia) e agregados graúdos (brita).

Com relação à origem, podem ser chamados de naturais, artificiais ou reciclados. Agregados naturais são os materiais extraídos em sua forma fragmentar, sendo esta a forma que o material se encontra na sua origem. Como exemplo, tem-se areia e cascalho. Agregados artificiais são os materiais extraídos em forma de blocos e precisam passar por processos de fragmentação, como a brita e areia britada. Agregados reciclados são subprodutos de outras atividades. Um exemplo são os rejeitos de demolição gerados na própria construção civil, cuja reutilização como agregado em concreto ou como base em pavimentação tem sido estudada exaustivamente nos últimos anos. O principal problema na reutilização de resíduo de demolição é a contaminação deste por material cerâmico, argamassas e principalmente pelo gesso existente.

Outro tipo de agregado reciclado é aquele oriundo de outras atividades industriais, e não a própria construção civil. No caso especial da indústria de rochas ornamentais, os subprodutos apresentam características mineralógicas e químicas, relativamente homogêneas e propriedades físicas normalmente dentro dos padrões de uso como

agregado. Não há a contaminação por materiais existentes oriundos de diferentes processos produtivos (como cerâmica, gesso e argamassa no caso do reaproveitamento de entulho), porém têm a desvantagem de não serem gerados dentro das grandes cidades, como o caso do rejeito de demolição.

Agregados são considerados produtos básicos para a indústria da construção civil apresentando, quando utilizados para confecção de concreto, consumo aproximado em volume de 45% a 50% de agregado graúdo e 35% a 40% de agregado miúdo.

Agregados constituem a maior produção mundial mineral por volume, e o segundo em valor, atrás somente do setor de combustíveis fósseis. A conexão dos agregados com a construção civil coloca-os entre os insumos mais usados no mundo, perdendo apenas para a água. Apesar disso, o setor sofre com falta de registros de dados de produção dificultando estudos coerentes a respeito das particularidades e tendências (Menegaki, 2010).

É recomendável que os órgãos públicos tomem iniciativas no sentido de tornar a extração de agregados o menos prejudicial possível e prolongar a vida útil das reservas disponíveis no território. Segundo Quarry Products Association (2004), algumas iniciativas governamentais a serem aplicadas seriam:

- conservar as reservas tanto quanto possível, porém assegurando suprir as necessidades por insumos;
- garantir que os impactos gerados pela extração mineral, bem como com o transporte sejam mantidos a um mínimo aceitável;
- minimizar a produção de resíduos e encorajar a aplicação eficiente dos agregados, incluindo o uso apropriado dos produtos de qualidade superior e a reciclagem dos resíduos gerados na extração / beneficiamento;
- encorajar projetos de recuperação de áreas degradadas;
- proteger áreas cuja preservação mostre-se de elevada importância ao desenvolvimento local.

De la Serna (2010 - a) apresentou dados referentes à produção e preço de agregados no Brasil. As tabelas 3.16 e 3.17 abaixo mostram a produção nacional e o preço de brita e areia, respectivamente, entre os anos de 2006 e 2009.

Tabela 3-16 Produção nacional de brita. 2006 à 2009 (de la Serna, 2010 - a)

Brasil	Produção de brita (e)							
	2006		2007		2008		2009	
	10 ⁶ t	10 ⁶ US\$	10 ⁶ t	10 ⁶ US\$	10 ⁶ t	10 ⁶ US\$	10 ⁶ t	10 ⁶ US\$
	164,9	1.159,2	185,2	1.621,4	216,8	2.500,6	216,3	2.648,6

Fonte: DNPM-Anuário Mineral Brasileiro. Densidade: 1,60t/m³. (e) Estimado através do consumo de Cimento e de Cimento Asfáltico de Petróleo.

Tabela 3-17 Produção nacional de areia. 2006 à 2009 (de la Serna, 2010 - a)

Brasil	Produção de areia (e)							
	2006		2007		2008		2009	
	10 ⁶ t	10 ⁶ US\$	10 ⁶ t	10 ⁶ US\$	10 ⁶ t	10 ⁶ US\$	10 ⁶ t	10 ⁶ US\$
	202,6	670,6	229,4	911,3	258,6	1.446,2	255,8	1.510,3

Fonte: DNPM-Anuário Mineral Brasileiro. Densidade: 1,64t/m³. (e) Estimado através do consumo de Cimento e de Cimento Asfáltico de Petróleo.

de la Serna (2010 - b) apresenta, também, dados referentes ao preço por estado de brita (no caso especificamente de brita n°2) e areia média, mostrados nas figuras 3.35 e 3.36.

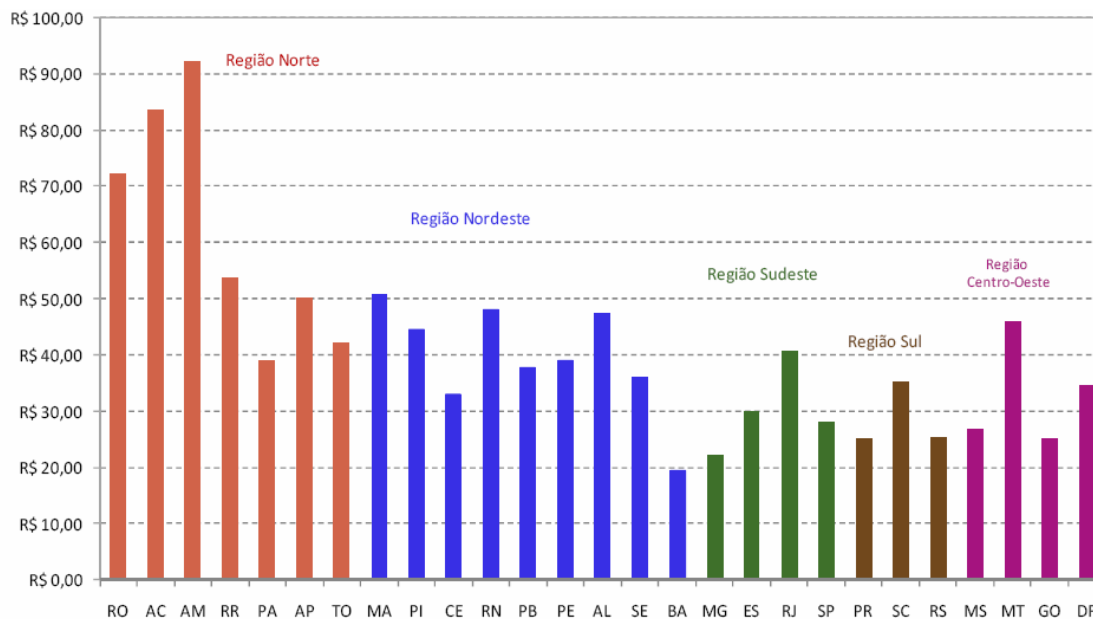


Figura 3-35 Produção nacional de brita n° 2 por estado (de la Serna, 2010 - b).

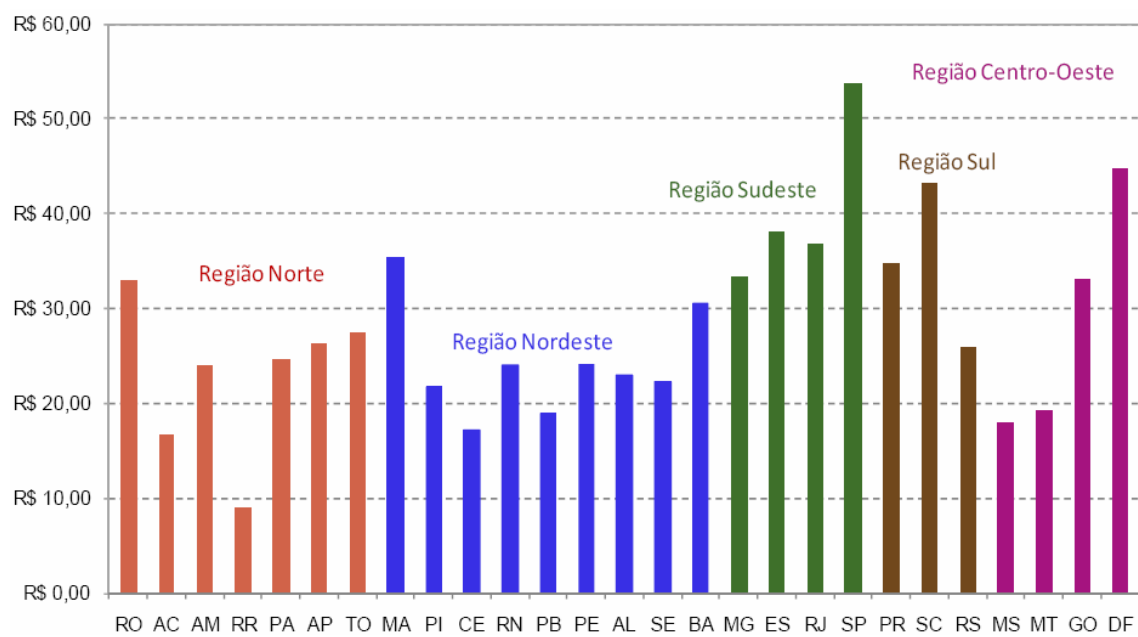


Figura 3-36 Produção nacional de areia média por estado (de la Serna 2010 – b).

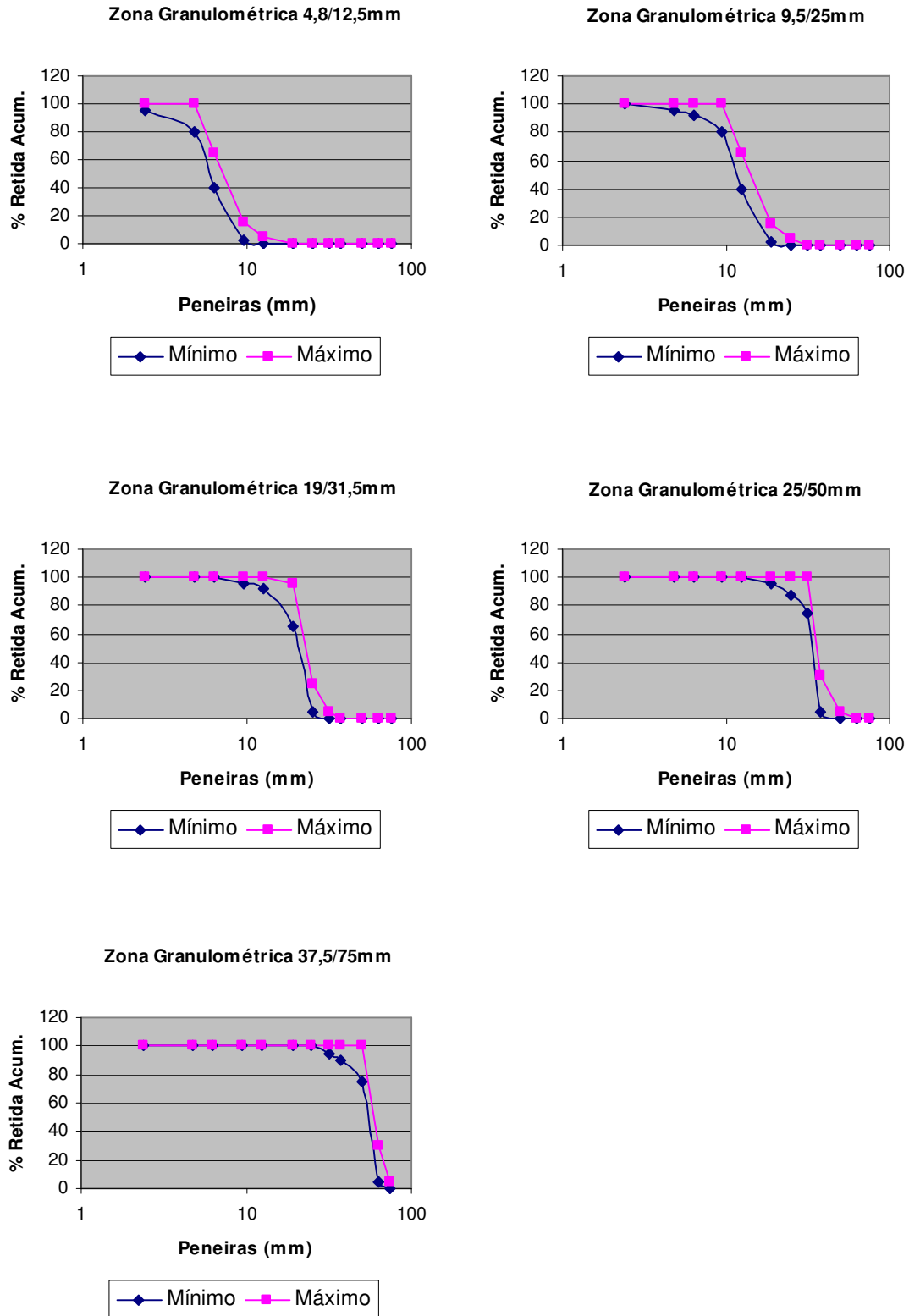


Figura 3-37 Zonas granulométricas de agregados graúdos.

Os agregados graúdos usados normalmente na construção civil são provenientes de britagem de rochas extraídas em pedreiras. Segundo Bernucci et al (2008), as rochas usadas normalmente como agregados são apresentadas na tabela 3.19:

Tabela 3-19 Tipos de rochas usadas como agregados (Bernucci et al, 2008)

Denominação Petrológica	Descrição
Andesito	Variedade de diorito vulcânico, de granulação fina
Basalto	Rocha básica de granulação fina, usualmente vulcânica
Conglomerado	Rocha constituída de blocos arredondados ligados por cimento natural
Diorito	Rocha plutônica intermediária, constituída de plagioclásio com hornblenda, augita ou biotita
Gabro	Rocha plutônica básica de granulação grossa, constituída de plagioclásio cálcico e piroxênio, algumas vezes com olivina
Gnaisse	Rocha riscada, produzida por condição metamórfica intensa
Granito	Rocha plutônica ácida, constituída principalmente de feldspatos alcalinos e quartzo
Calcário	Rocha sedimentar, constituída principalmente de carbonato de cálcio
Quartzito	Rocha metamórfica ou sedimentar constituída quase que totalmente por grãos de quartzo
Riolito	Rocha ácida, de granulação fina, usualmente vulcânica
Sienito	Rocha plutônica intermediária, constituída de feldspatos alcalinos com plagioclásios, hornblenda, biotita ou augita
Traquito	Variedade de sienito de granulação fina, usualmente vulcânico

No Brasil, os agregados graúdos mais usados são as rochas britadas extraídas em frentes de lavra que se caracterizam por serem de bancada (empresas de maior porte) ou paredão (empresas de pequeno porte). Na etapa de desmonte primário, via detonação, são originados os blocos de tamanhos maiores, também chamados blocos primários (dimensões maiores que um metro). Esses blocos são, então, reduzidos de tamanho na etapa de desmonte secundário, originando os chamados blocos secundários (de tamanho que permita carregamento, transporte e alimentação do britador primário). O desmonte secundário pode dar-se por detonação ou por meio mecânico, dependendo do tamanho do bloco e da capacidade da empresa de contar com equipamento adequado. O carregamento geralmente é feito via pás carregadeiras, mas também podem ser usadas escavadeiras. O transporte é realizado por caminhões convencionais ou fora de estrada (figura 3.38).

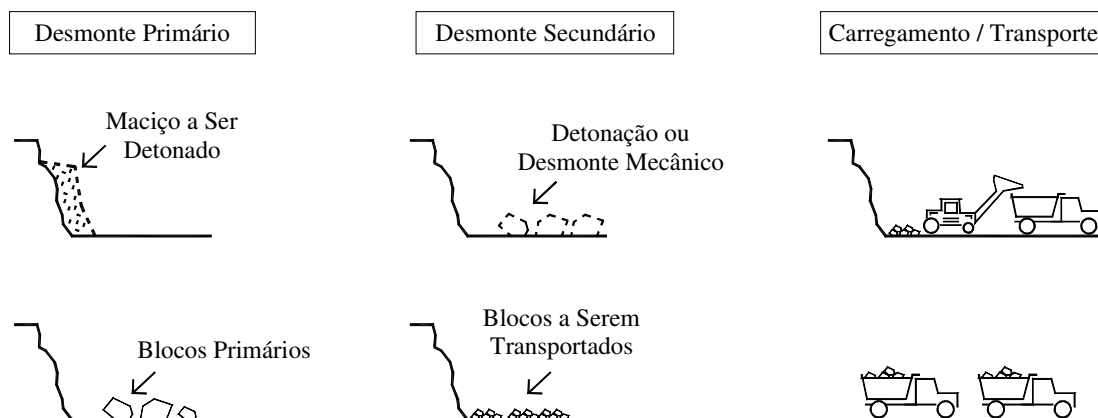


Figura 3-38 Produção de agregados – Desmonte, carregamento e transporte.

Após o transporte do material até a planta de britagem, este passa por uma classificação inicial (peneira vibratória) para a eliminação de partículas que podem ser material de resistência inferior desprendido durante a detonação ou desmonte mecânico; ou algum tipo de contaminação do material durante essas etapas ou durante o carregamento. O material retido na peneira ($\#>25$ mm) vai para o britador primário.

A britagem primária é a primeira operação unitária em uma planta de cominuição. O propósito da mesma é unicamente a redução de tamanho. De modo geral, podem ser usados britadores de mandíbula (para pequenas e médias capacidades), ou britadores giratórios (médias e grandes capacidades). O britador de mandíbulas é mais usado na britagem primária de plantas de produção de agregados no Brasil. Nessa etapa, pode haver aspersão de água na alimentação com o objetivo de reduzir o teor de material pulverulento no produto.

O número de estágios de britagem depende do tamanho e da dureza do material de alimentação, bem como da qualidade do produto final (granulometria e formas finais). Para britagem primária de material dinamitado, abrasivo e com produção abaixo de 800 t/h, a empresa fornecedora de britadores Metso (Metso, 2005) recomenda britadores de mandíbula. Já, no caso de britagem primária para produções acima de 800 t/h, recomenda o britador giratório, e para britagem secundária do material abrasivo, recomenda o britador cônico.

Após a britagem primária, é feita a primeira etapa de classificação, em peneiras vibratórias, onde o diâmetro de corte corresponde ao diâmetro máximo do produto de maior granulometria (na figura 3.39, esse corte é em 25mm, limite granulométrico superior da brita 2). O passante é novamente classificado em outras peneiras vibratórias no sentido de produzir produtos dentro das faixas granulométricas indicadas pela ABNT NBR 7211 / 2005 (Agregados para concreto – Especificação).

O material retido na primeira etapa de classificação (no caso do fluxograma da figura 3.39, partículas maiores que 25mm) segue para a britagem secundária, cujos objetivos, além da redução de tamanho, são a quebra das partículas microfraturadas, bem como a obtenção de partículas de maior cubicidade, ou seja, índice de forma mais próximo de um (partículas não alongadas). Normalmente, são usados britadores cônicos nessa etapa.

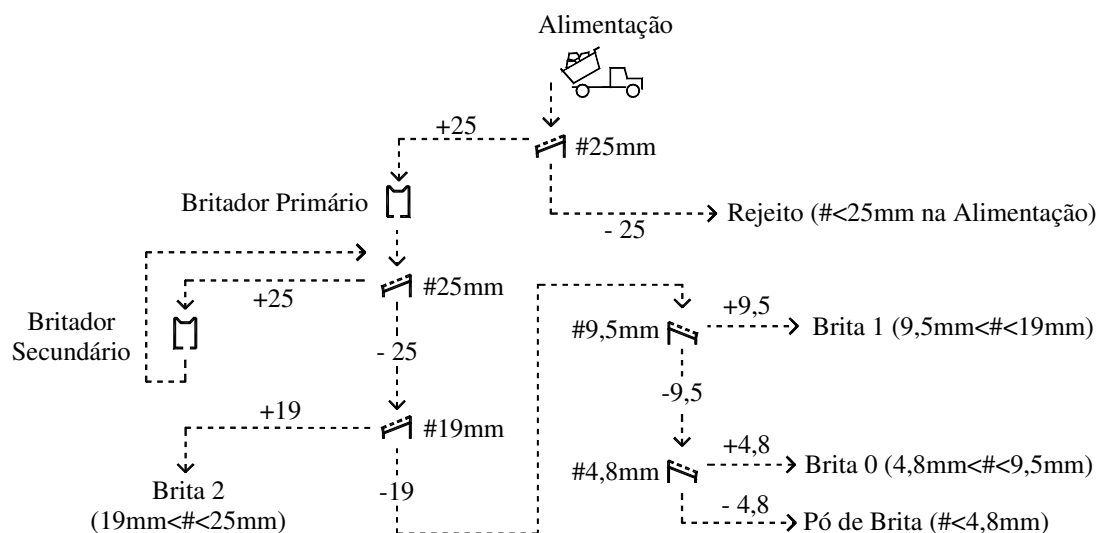


Figura 3-39 Fluxograma típico de planta de britagem e classificação para produção de brita 2 e frações menores.

O transporte de brita entre os britadores e/ou rebitadores é feito, normalmente, por um sistema de correias transportadoras, sempre procurando aproveitar o desnível topográfico para economia na planta de beneficiamento. Para diminuir o pó em suspensão, gerado pela atividade de britagem, algumas das pedreiras utilizam sistemas de aspersores de água, instalados nas bocas dos britadores e nas correias transportadoras.

Guimarães et al (2007) apresentam, na figura 3.40, particularidades dos britadores usados na cominuição de agregados.

Crusher type	Primary crushers		Secondary and tertiary crushers
	Jaw	Gyratory	Cone
Main purpose	Size reduction		Size reduction, cubicity and breakage of microfractured particles
Production line	<i>Open circuit</i>		<i>Secondary: open circuit, tertiary: closed circuit</i>
Reduction ratio	2:1 to 10:1 <i>3:1 to 7:1</i>	3:1 to 10:1	2:1 to 8:1 <i>2:1 to 6:1</i>
Fines <0.075 mm (percentage of feed)	3.5%	4.7%	<i>Secondary: 1.1%, tertiary: 1.6–1.9%</i>

Figura 3-40 Particularidades de britadores usados na produção de agregados (Guimarães et al, 2007).

Peres et al (2002) apresentam corte esquemático de britador de mandíbulas de dois eixos (figura 3.41). Na figura 3.42, pode-se ver um corte esquemático de britador giratório (www.sandvik.com).

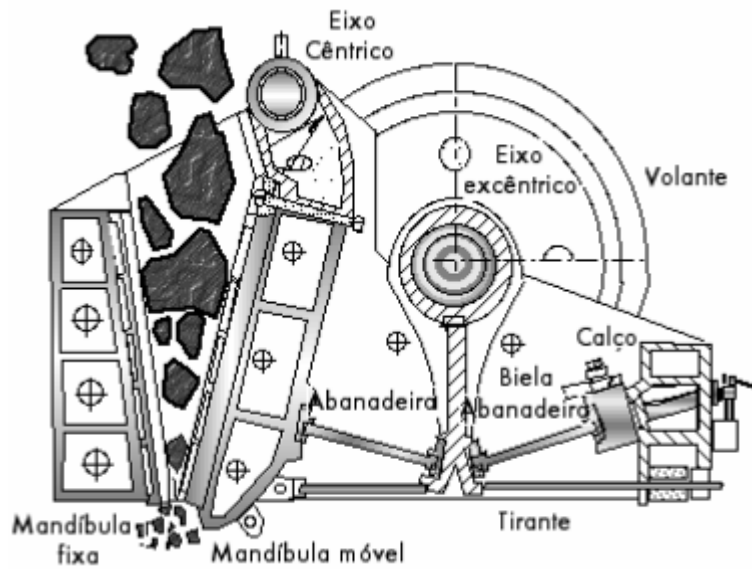


Figura 3-41 Corte de um britador de mandíbulas de dois eixos (Peres et al, 2002).



Figura 3-42 Corte de um britador giratório.
Fonte: www.sandvik.com – acessado em 17-08-2011

Rodrigues (2004) ressalta o impacto ambiental gerado por extração de rocha em pedreiras para serem britadas, gerando agregados graúdos para a indústria da construção civil. A extração e beneficiamento de agregados graúdos geram fortes impactos ambientais devido a fatores como geração de finos, poeira, ruído etc. (figura 3.43).

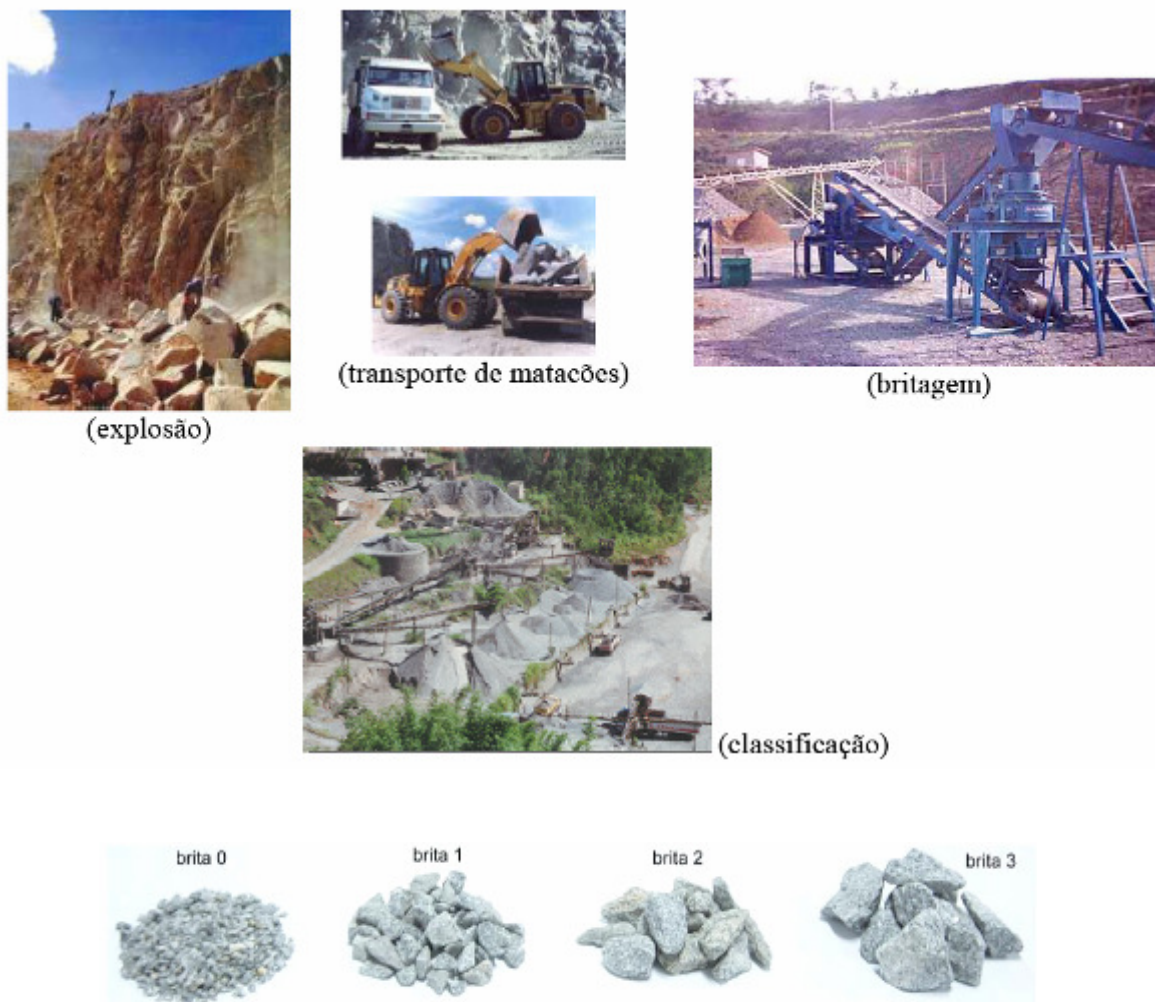


Figura 3-43 Extração e beneficiamento de agregado graúdo (Rodrigues, 2004).

3.4.2 Agregado Miúdo

Segundo a ABNT NBR 7211 / 2005 (Agregados para concreto – Especificação), agregado miúdo é o agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm, em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248 / 2001 (Agregados – Determinação da composição granulométrica).

A ABNT NBR 9935 / 2005 (Agregados – Terminologia) define areia como “agregado miúdo originado através de processos naturais ou artificiais de desintegração de rochas ou proveniente de outros processos industriais. É chamado de areia natural se resultante de ação de agentes da natureza, de areia artificial quando proveniente de processos industriais, de areia reciclada, quando proveniente de processos de reciclagem, e de areia de britagem, quando proveniente do processo de cominuição mecânica de rocha, conforme normas específicas”.

Areias naturais são sedimentos clásticos gerados por processos de fragmentação de rocha, constituídos, basicamente, por partículas de quartzo, podendo conter minerais secundários. Os processos de desagregação e transporte podem ocorrer em meio aquoso ou eólico. As características físicas dos grãos, como as dimensões, grau de arredondamento e de esfericidade, estão relacionadas com a distância de transporte e o meio no qual as partículas foram transportadas.

O agregado miúdo mais usado na construção civil é a areia, extraída em leito de curso de água (por dragagem); em cava seca (por simples carregamento ou por desmonte hidráulico); ou extraída em cava submersa (por dragagem). O fato da areia extraída em leitos de cursos de água encontrar-se submersa e ter sofrido transporte ao longo do curso de água faz com que apresente duas características importantes quando usada como agregado para concretos e argamassas: baixo teor de finos e baixo teor de material pulverulento.

Nas últimas décadas, o consumo de agregados aumentou consideravelmente. As regiões de extração de areia tornaram-se cada vez mais distantes dos centros urbanos devido à exaustão das fontes de material e também por questões ambientais, o que gerou um

aumento substancial no preço da areia. Isso incentivou o uso de outras fontes de matéria-prima, mesmo que ofereçam materiais com características distintas da areia de leito de rio.

A norma ABNT NBR 7211 / 1983 (Agregados para concreto) determina as faixas granulométricas de agregados miúdos, classificados como areia muito fina, areia fina, areia média e areia grossa (Tabela 3.20 e Figura 3.44).

Tabela 3-20 Classificação de agregados miúdos por faixas granulométricas (adaptado de NBR 7211, 1983)

<i>Peneira (mm)</i>	<i>% Retida Acumulada</i>							
	<i>Areia Muito Fina</i>		<i>Areia Fina</i>		<i>Areia Média</i>		<i>Areia Grossa</i>	
	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.
9,5	0	0	0	0	0	0	0	0
6,3	0	3	0	7	0	7	0	7
4,8	0	5	0	10	0	11	0	12
2,4	0	5	0	15	0	25	5	40
1,2	0	10	0	25	10	45	30	70
0,6	0	20	21	40	41	65	66	85
0,3	50	85	60	88	70	92	80	95
0,15	85	100	90	100	90	100	90	100

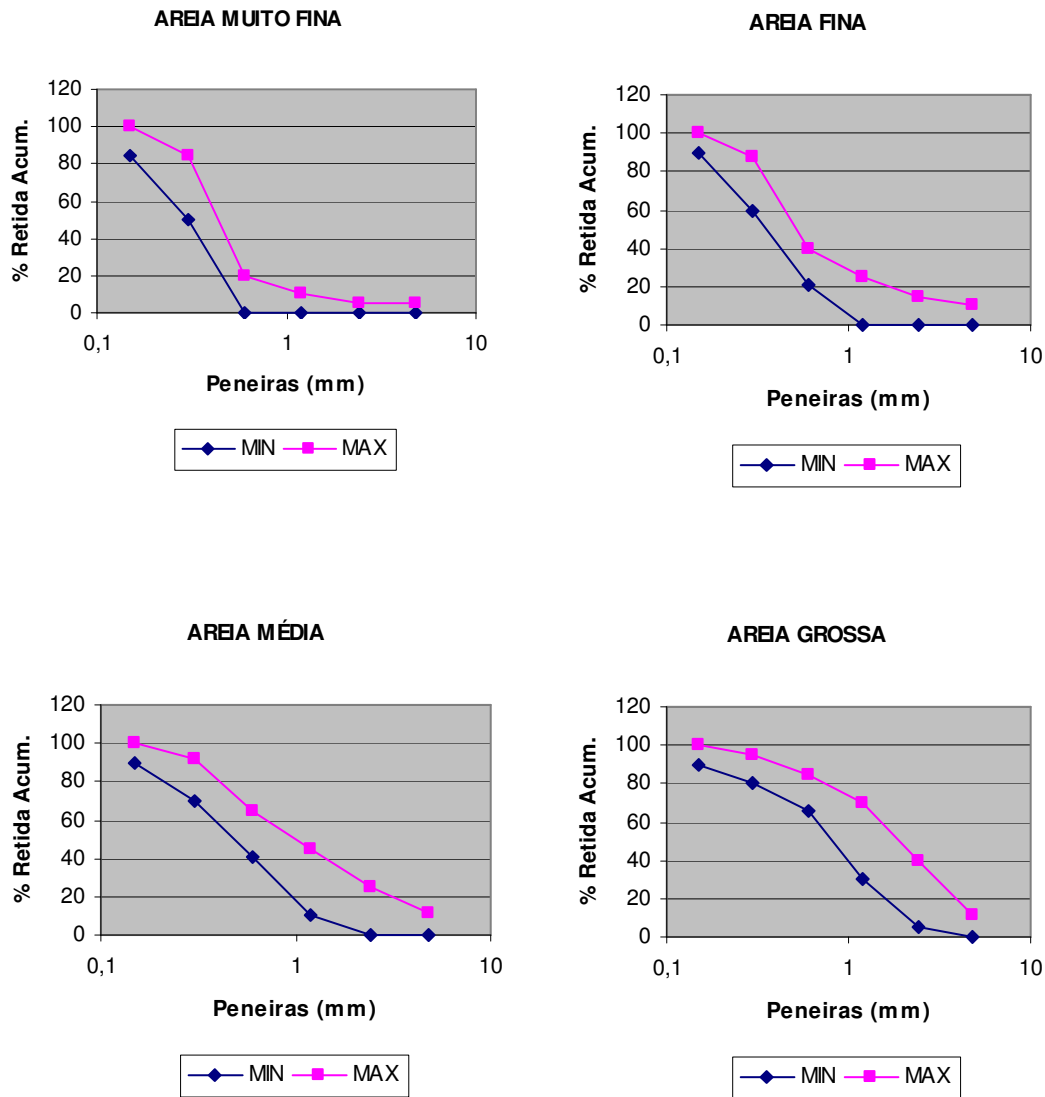


Figura 3-44 Classificação de agregados miúdos por distribuição granulométrica.

Os termos “areia muito fina”, “areia fina”, “areia média” e “areia grossa” ainda são bastante usados em obras, fornecedores, produtores de pré-moldados e até em trabalhos científicos recentes. Porém a versão mais recente dessa norma NBR 7211 / 2005 (Agregados para concreto - especificações) apresenta granulometrias em função de dois limites máximos e outros dois limites mínimos (utilizáveis e toleráveis) para os agregados miúdos (Tabela 3.21 e figura 3.45).

Tabela 3-21 Limites granulométricos máximos e mínimos para agregados miúdos (adaptado de NBR 7211, 2005)

Peneira (mm)	% Retida Acumulada			
	Limites Inferiores		Limites Superiores	
	Utilizável	Ótimo	Ótimo	Utilizável
9,5	0	0	0	0
6,3	0	0	0	7
4,8	0	0	5	10
2,4	0	10	20	25
1,2	5	20	30	50
0,6	15	35	55	70
0,3	50	65	85	95
0,15	85	90	95	100

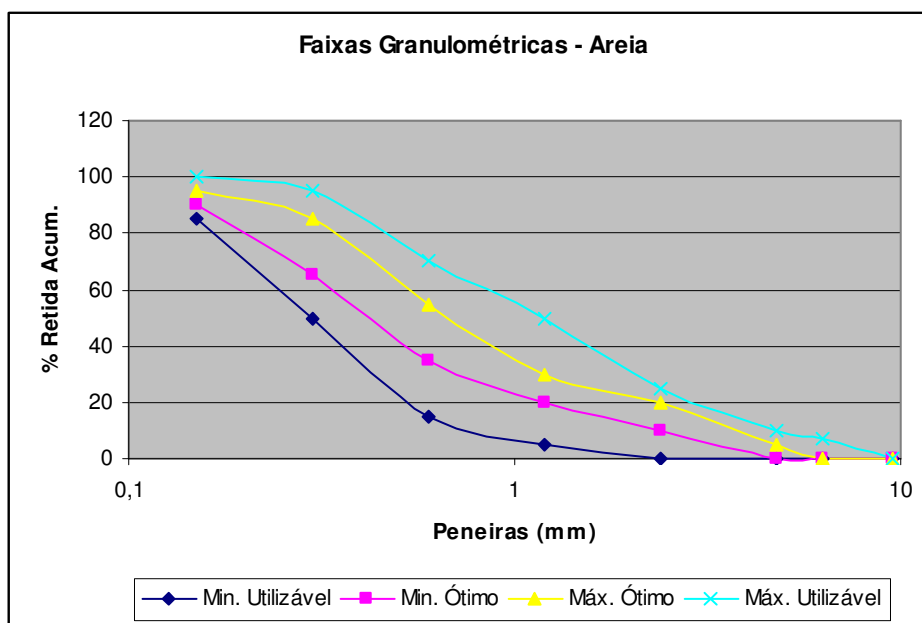


Figura 3-45 Faixas granulométricas máximas e mínimas de agregados miúdos.

Os limites granulométricos determinam a trabalhabilidade, a resistência final e o custo do concreto. Areias de granulometria grosseira produzem concretos ásperos e de baixa trabalhabilidade. Já areias muito finas, que apresentam maior área específica, elevam o consumo de água, o que acarreta um decréscimo na resistência final do concreto. Esse efeito é compensado por maior adição de cimento, o que eleva o custo do concreto.

Além da granulometria, a NBR 7211 / 2005 (Agregados para concreto - especificações) cita ensaios para se avaliarem os teores de substâncias nocivas, ensaios de durabilidade e alguns ensaios especiais (opcionais), feitos para se caracterizarem agregados miúdos:

a. Teores de Substâncias Nocivas:

- torrões de argilas e materiais friáveis;
- materiais carbonosos;
- material fino que passa através da peneira 75 μ m por lavagem (material pulverulento);
- impurezas orgânicas;

b. Durabilidade

- reatividade álcali-agregado;
- teor de cloretos;
- teor de sulfatos solúveis;

c. Ensaio Especiais (propriedades físicas):

- massa específica;
- massa unitária;
- absorção de água;
- inchamento;
- teor de partículas leves;
- umidade superficial.

Segundo PORMIN (2011), o beneficiamento da areia para construção é um processo executado concomitantemente à lavra e se constitui de lavagem, peneiramento, classificação e desaguamento (secagem). A lavagem pode ser considerada como uma operação de beneficiamento nos métodos da lavra da cava seca e da cava submersa, com sucessiva movimentação e lavagem da areia.

No método de lavra em leito de rio, pelo fato da areia ser succionada diretamente da jazida até as peneiras dos silos, a lavagem não chega a caracterizar-se de fato uma operação de beneficiamento. Na lavra de cava seca, a lavagem é mais intensa e feita mediante o jateamento de água na areia armazenada nos tanques de decantação, e proveniente da caixa de acumulação (PORMIN 2011).

São três os tipos de lavra de areia:

- ***lavra de cava seca:*** escavação e desmonte hidráulico de planície aluvionar;
- ***lavra de cava submersa:*** dragagem planície aluvionar ou de áreas concumitantes a leitos de rio;
- ***lavra em leito de rio:*** dragagem de leitos de rios.

Segundo Quaresma (2009), o desmonte hidráulico é feito com jato de água sob pressão, (em polpa com 15% de sólidos) direcionado à base do talude, fazendo com que o material desmorone de forma controlada e seja carregado em forma de polpa, com o auxílio da gravidade. A frente de lavra assume formas irregulares de avanço, com alturas recomendadas de 5 a 15m.

As principais vantagens são:

- alta produção;
- baixos custos operacionais (se comparado ao desmonte mecânico);
- baixos investimentos;
- boa recuperação;

- bombeamento da polpa para as instalações de beneficiamento, o que promove a desagregação e atrição inicial das partículas.

As desvantagens desse método são:

- considerável necessidade de água;
- limitado a depósitos inconsolidados que se desagregam hidráulicamente;
- baixa seletividade.

A dragagem é um sistema de bombeamento que realiza a sucção da polpa na cota de fundo do curso de água. O sistema de bombeamento pode ser montado sobre barcaça móvel, que transporta o minério; ou barcaça com ancoragem fixa, com o minério sendo transportado por tubulação.

Segundo Frazão (www.cetec.br em 23-04-2011) e Campos e Ampli Fernandes (2006), o método de *cava seca* inicia-se pelo decapeamento (retirada da camada vegetal), geralmente feito com tratores de esteiras e/ou pás-carregadeiras. A extração dá-se por desmonte hidráulico ou utilizando os mesmos equipamentos usados no decapeamento. Mesmo quando a extração é feita por desmonte hidráulico, podem-se usar equipamentos para uma escarificação prévia. (Figura 3.46)

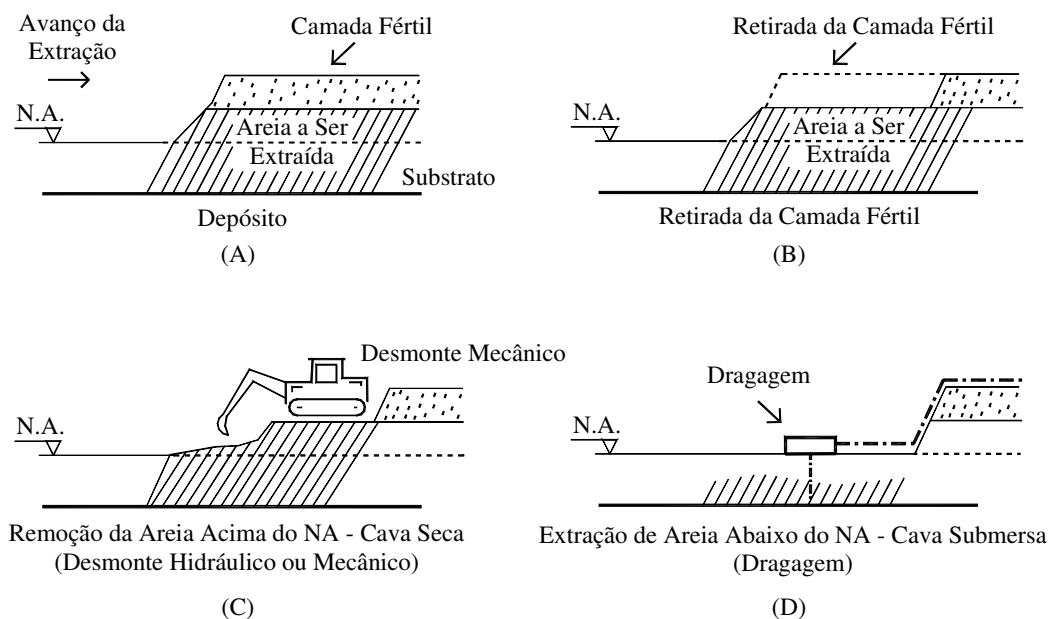


Figura 3-46 Extração de areia em cava seca.

No método de *cava submersa* (ou fechada), a extração é feita na base e nas paredes laterais de uma cava preenchida com água através de uma draga, instalada sobre um barco e equipada com bombas centrífugas. Muitas vezes a extração evolui de cava seca para cava submersa (Figura 3.47).

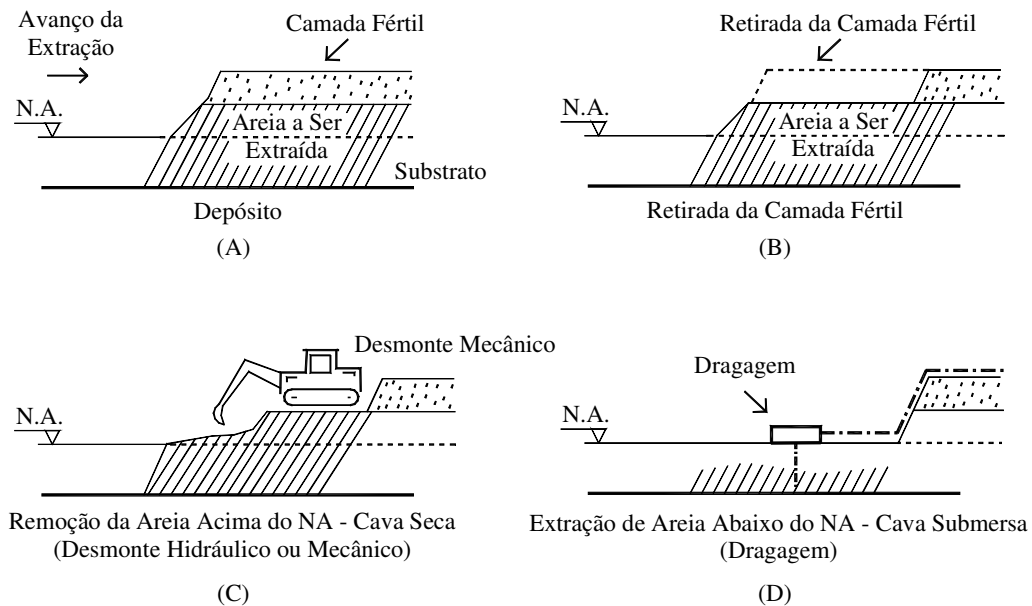


Figura 3-47 Extração de areia em cava submersa (evoluída de cava seca).

A extração em *leito de rio* consiste na dragagem dos sedimentos existentes nos leitos dos rios em profundidades não muito elevadas. A dragagem é feita através de bombas de sucção instaladas sobre barcaças ou flutuadores. O processo da extração por esse método causa elevado assoreamento e poluição dos rios (Figura 3.48).

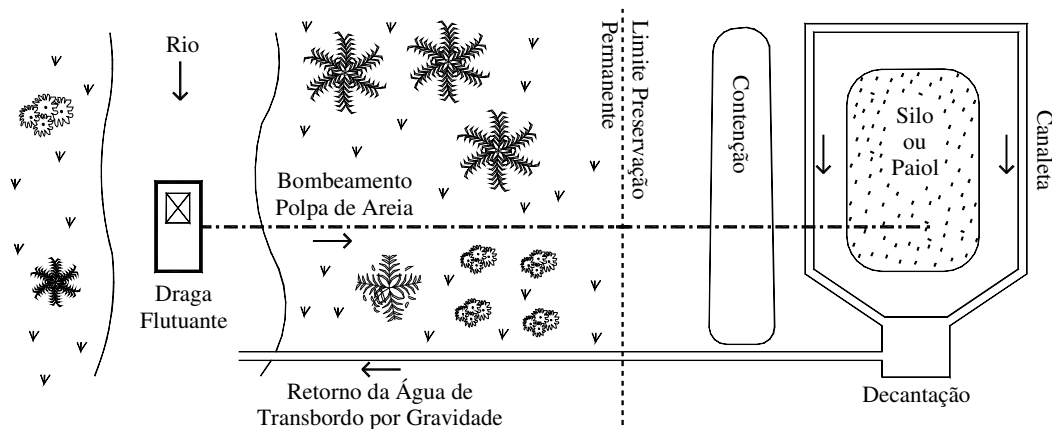


Figura 3-48 Extração de areia em leito de rio.

Os maiores danos ambientais causados por extração de areia em leito de rios são:

- alteração da paisagem;
- supressão da vegetação, principalmente da mata ciliar;
- alteração na calha dos cursos d'água;
- instabilidade de margens e taludes;
- turbidez da água;
- lançamento de efluentes.

Vale ressaltar que a turbidez da água ocorre devido aos sólidos em suspensão, que mudam completamente as características químicas e físicas (densidade, transmissão de luz, etc...) da água a jusante da lavra, prejudicando fauna e flora. Quando o curso de água encontra condições favoráveis (baixa velocidade de fluxo devido a menor declividade), ocorre a sedimentação do material em suspensão. Logo os impactos ambientais de extração de areia, principalmente em leito de rio, não são necessariamente locais, pois podem ser observados a quilômetros de distância ao longo do curso dos rios. Segundo Almeida e Silva (2005), atualmente, 90% da produção nacional de areia natural no Brasil é obtida a partir da extração em leito de rios.

A figura 3.49 mostra degradação ambiental provocada por mineração de areia na várzea do rio Paraíba do Sul (SP). São vários os poços formados por extração de areia em cava submersa (Mechi et al, 2010).



Figura 3-49 Cavas submersas para extração de areia (Mechi e Sanches, 2010).

Além da extração, já na condição a ser usada (em cavas ou leitos de rio), o agregado miúdo (areia) pode ser extraído como sub-produto da extração de agregados graúdos, ou como produto oriundo de maciços rochosos lavrados com esse objetivo. Segundo Calaes (2005), seja sob o ponto de vista econômico ou ambiental, a produção de areia de brita evidencia interessantes perspectivas, quer seja entendida como sub-produto (oriundo dos finos de britagem), ou como co-produto (a partir da rocha dura). No primeiro caso, devido ao formato frequentemente lamelar ou alongado das partículas contidas nas frações mais finas do pó de pedra, o mercado mais afeiçoado ao sub-produto areia de brita é o da pavimentação com concreto. No segundo caso, a utilização de novos processos e equipamentos tem propiciado a obtenção de areia de brita com partículas arredondadas. As características do co-produto areia de brita correspondem às especificações de diferentes segmentos do mercado da construção civil.

3.4.3 Agregado para Argamassa

Argamassa é uma mistura de aglomerantes (cimento e cal), agregado miúdo (areia) e água. Pode ser constituída de apenas um aglomerante (cimento ou cal), porém a composição mais usada para argamassas produzidas em obras é com os dois aglomerantes.

Argamassas podem ser preparadas nas obras (usadas na grande maioria dos casos) ou vendidas com os constituintes secos (aglomerantes e agregado) já dosados, bastando apenas adicionar água em quantidade especificada e misturar.

No Brasil, existem tendências regionais de se utilizar filito, caulim, argila ou saibro no lugar da cal em argamassas, pois, assim como a cal, aumentam a plasticidade, a coesão, e a retenção de água, porém não são aglomerantes e, quando adicionados em excesso, podem provocar retração hidráulica acentuada. Martins Neto e Djanikian (1999) estudaram vários traços, normalmente aplicados em argamassa misturada em obra e traços de argamassa dosada em central, e concluíram que o traço padrão usado em obras, o 1:2:9 (cimento:cal:areia), pode ser comparado aos traços 1:7 ou 1:8 (cimento:areia + aditivos).

Argamassas são usadas para “encaixar” os tijolos cerâmicos ou blocos de concreto entre si formando paredes ou muros (função de assentamento); para se revestir paredes, lajes e muros (função de revestimento, também chamada de reboco); para se regularizar as superfícies onde serão assentados os pisos (função de contra-piso); para se “colar” revestimentos às paredes, contra-pisos e muros (função de assentamento de revestimentos).

Argamassas com função de assentamento de revestimentos, já há muitos anos, não são produzidas em obras. Para esse objetivo, têm-se as argamassas colantes industrializadas. São vários fabricantes que oferecem produtos específicos para cada tipo de revestimento a ser assentado em função de vários parâmetros específicos:

- tamanho e peso das peças cerâmicas;
 - tipo de substrato;
 - condições climáticas (revestimento interno ou externo);
 - posição do substrato (revestimento vertical para parede ou horizontal para piso);
 - carga no substrato (piso para garagem ou passagem de pedestres);
 - casos especiais como revestimento de piscina.
- *O traço*

Toda argamassa é caracterizada em função de uma relação de constituintes secos (aglomerante : agregados) chamada “traço”. Na tabela 3.22 abaixo, são apresentados vários traços usados comumente em argamassas:

Tabela 3-22 Tipos de argamassas e traços usuais – Argamassas dosadas em obras

Utilização		Componetes Traço	Areia	Recomendações
Assentamento de Alvenaria		Cimento:Cal:Areia 1:2:8	Média	Paredes de tijolo cerâmico.
		Cimento:Cal:Areia 2:1:10	Média	Alvenaria de elementos vazados de concreto.
Revestimento (Reboco)	1º Camada (Chapisco)	Cimento:Areia 1:3	Grossa	Adicionar aditivo caso chapisco seja em concreto.
	2º Camada (Emboço)	Cal:Areia 1:3	Média Lavada	Para 3ª camada (acabamento) no caso de reboco à base de cal.
		Cimento:Cal:Areia 1:2:8	Média Lavada	Para 3ª camada (acabamento) no caso de reboco à base de cimento e cal.
	3º Camada (Acabamento)	Cal:Areia 1:3 à 1:4	Fina	Traços 1:3 para reboco externo e 1:4 para reboco interno à base de cal.
		Cimento:Cal:Areia 1:2:9	Fina	Reboco à base de cimento e cal. Espessura máxima de 5mm.
Regularização ou Nivelamento (Contra-Piso)		Cimento:Areia 1:4 à 1:5	Média ou Grossa	Argamassa com menos água possível.

O “Brick Industry Association” (B.I.A. 1988) apresenta quatro traços gerais para argamassa dependendo da aplicação da mesma e as respectivas resistências à compressão mínimas (tabela 3.23). A adição de agregados para esses traços pode estar entre 2¼ e 3 vezes a soma de material aglomerante (cimento e cal).

Tabela 3-23 Tipos de argamassas e traços recomendados pela “Brick Industry Association” (B.I.A., 1988)

Tipo	Descrição	Partes - cimento (em volume)	Partes - Cal Hidratada (em volume)	Resist. Compressão Mínima MPa (28 dias)
M	Alta resistência à compressão - Alvenaria em contacto com solo	1	¼	17,2
S	Elevada resistência Mecânica	1	de ¼ a ½	12,4
N	Resistência média - Usos gerais	1	de ½ a 1¼	5,2
O	Baixa resistência - Paredes divisórias de alvenaria	1	de 1¼ a 1½	2,4

O consumo de cimento varia em função do uso da argamassa. Quanto maior a adição de cimento à mistura, maior a resistência à compressão. Martins Neto e Djanikian (1999) estudaram traços de argamassa viradas em obras (VO) no traço 1:2:9 (cimento:cal:areia) e argamassas dosadas em central (ADC) nos traços 1:6, 1:7, 1:8 e 1:9 (cimento:areia), relacionando a resistência à compressão de cada um dos traços com o consumo de cimento (Figura 3.50).

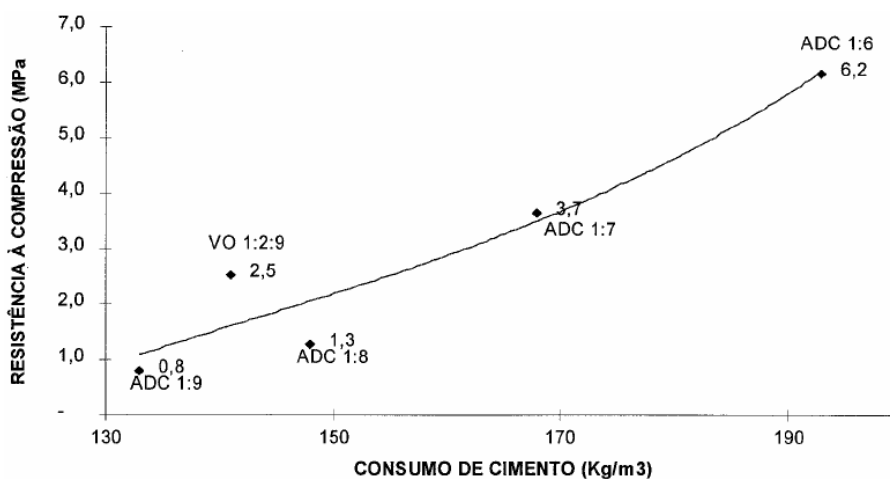


Figura 3-50 Relação consumo de cimento x resistência à compressão em argamassas (Martins Neto e Djanikian, 1999).

- **Relação água/cimento**

Além da relação de constituintes secos, outro parâmetro importante a ser levado em conta na produção de argamassas, principalmente argamassas para revestimento, é a quantidade de água na mistura. A quantidade de água é expressa em relação à massa do cimento segundo a “relação água/cimento”.

$$\text{Relação água/cimento: } A/C = \frac{\text{Volume}_{\text{água}} (\text{litros})}{\text{Massa}_{\text{cimento}} (\text{kg})}$$

Essa relação não é fixa. Ela pode variar em função de vários fatores:

- características da areia;
- características da cal usada;
- características do cimento;
- resistência necessária da argamassa.

- **Teor de finos**

Sabe-se que, quanto mais material fino em uma mistura (argamassa ou concreto), mais cimento será demandado para mesmas faixas de resistência à compressão, devido ao aumento da área superficial. [Benachour \(2008\)](#) estudou a aplicação de finos de britagem de rocha calcárea em argamassa ($\# < 100\mu\text{m}$) em porcentagens de 15 a 45% e apresentou o gráfico 3.51, no qual mostra o aumento da relação água/cimento em relação ao aumento do teor de finos.

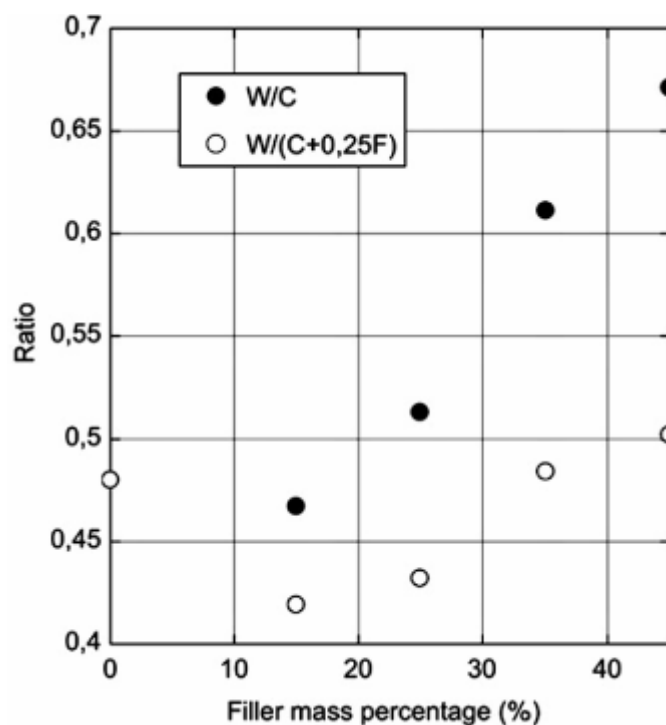


Figura 3-51 Porcentagem de finos x Relação água/cimento em argamassas (Benachour et al, 2008).

O gráfico da figura 3.52 abaixo mostra a variação das resistências à compressão e à flexão, após 28 dias de corpos de prova de argamassa em função de porcentagem de finos. Observa-se que houve, inclusive, um aumento da resistência à compressão para adições de finos próximas a 10% (Benachour et al, 2008).

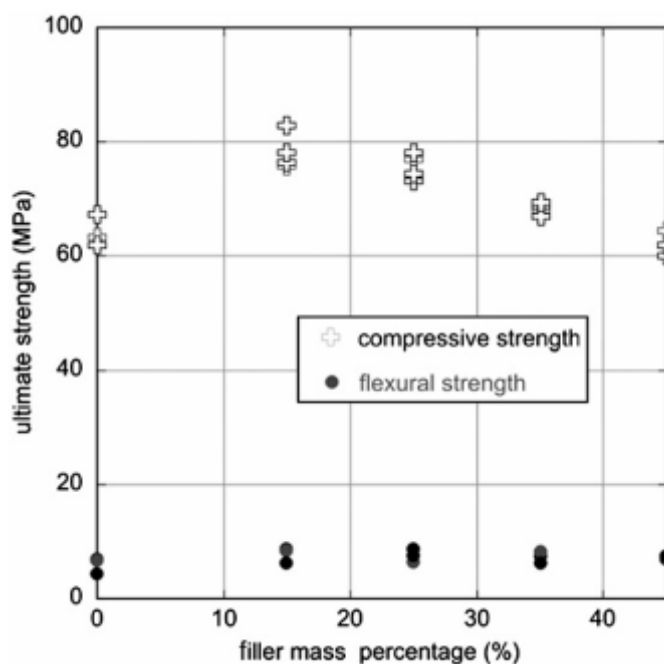


Figura 3-52 Porcentagem de finos x Tensão máxima à compressão em argamassas (Benachour et al, 2008).

Silva et al (2005) fizeram testes comparando características de argamassa produzida com areia natural e argamassa com areia de britagem em termos de teor de finos ($\# < 75\mu\text{m}$) e de forma das partículas. Segundo os autores, a areia natural, com partículas sub arredondadas e mais esféricas, produziu argamassas com as seguintes características em relação à argamassa com areia britada (partículas angulosas e menos esféricas) no traço 1:1:6 em volume:

- menor exigência de água;
- menor retenção de água;
- maior retenção de consistência;
- menor teor de ar aprisionado;
- menor absorção de água por capilaridade;
- menor densidade de massa aparente;
- menores resistências à compressão e à tração na flexão.

Argamassas produzidas com areia britada de rocha calcária com presença de 6,0% de finos apresentaram menor teor de ar aprisionado, menor densidade de massa aparente, melhorando o empacotamento da mistura agregado/aglomerante. Houve inclusive aumento nas resistências à compressão e à tração na flexão em relação a argamassas de areia britada com 0,7% de finos, no traço 1:1:6, em volume.

Sampaio e Barbato (2007) determinaram curvas de produto de moagem de rejeito de rocha ornamental, com o objetivo de analisar-se o percentual das várias frações no produto (no caso, de feldspato pegmatítico). Através dessa curva, é possível determinar o tempo de moagem necessário à redução granulométrica de uma amostra de feldspato, mantendo-se as mesmas condições operacionais, como indicado na figura 3.53.

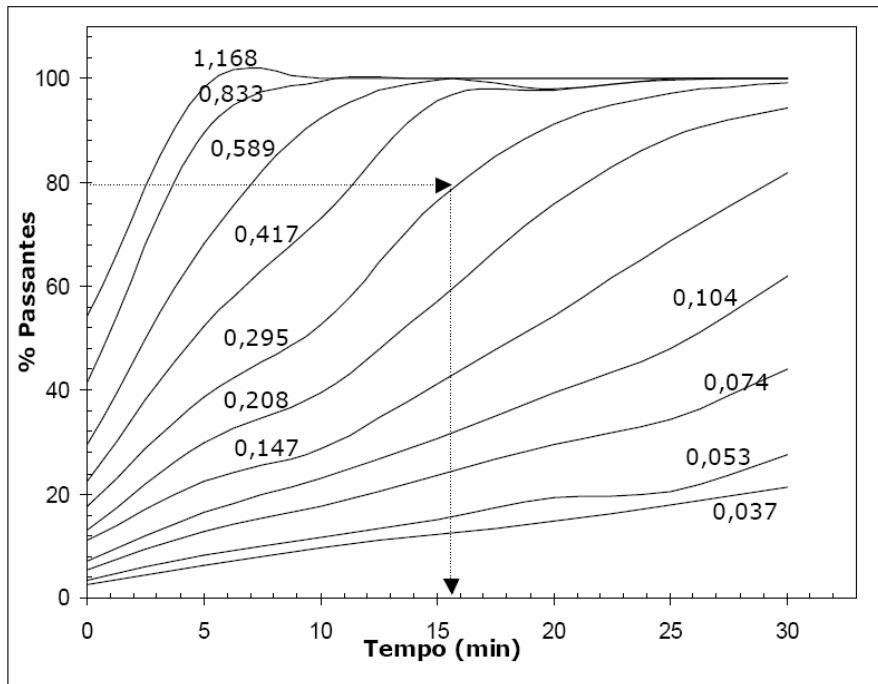


Figura 3-53 Exemplo de curvas de produto de moagem (Sampaio e Barbato, 2007).

3.4.4 Agregado para Pré-Moldados

No mundo, a cada ano, intensifica-se o processo de industrialização das obras, o que faz com que, cada vez mais, etapas sejam executadas de maneira o mais otimizada possível, obtendo-se ganhos em relação ao tempo de execução, à qualidade final, ao custo, à segurança e ao controle na execução das tarefas.

A premissa básica de se otimizar uma obra está em ter o máximo de elementos construtivos produzidos de maneira industrializada, seja no canteiro de obra ou em parques industriais especializados. Esses elementos são os chamados *pré-moldados* ou *pré-fabricados*.

A NBR 9062 / 2001 (Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado) define as diferenças entre os termos pré-moldado e pré-fabricado:

- *elemento Pré-Moldado:*

Elemento executado fora do local de utilização definitiva na estrutura; é produzido em condições menos rigorosas de controle de qualidade. Devem ser inspecionados individualmente ou por lotes, através de inspetores do próprio construtor, da fiscalização do proprietário ou de organizações especializadas, dispensando-se a existência de laboratório e demais instalações congêneres próprias.

- *elemento Pré-Fabricado:*

Tipo de elemento pré-moldado executado industrialmente, mesmo em instalações temporárias em canteiros de obra, sob condições rigorosas de controle. Podem ser produzidos em usinas ou instalações analogamente adequadas aos recursos para produção e que disponham de pessoal, organização de laboratório e demais instalações permanentes para o controle de qualidade, devidamente inspecionada pela fiscalização do proprietário e que atendam ainda a requisitos específicos quanto a condições de fabricação, formas utilizadas, ferragens, identificação de peças e inspeção de produto.

Neste trabalho, serão abordados os elementos pré-moldados, pois são para esse fim que se propõe a aplicação do rejeito de extração de quartzito como agregado.

Abaixo são mostrados vários tipos de elementos pré-moldados comercializados hoje no Brasil, como blocos de vedação, blocos canaleta, blocos sextavados para pavimentação, manilhas, caixas de passagem para sistemas de drenagem pluvial e mourões (Figura 3.54 e Figura 3.55).



Figura 3-54 Pré-moldados de concreto

Fonte: <http://www.premoldadostamoyo.com.br> (acessado em 17/06/2011).



Figura 3-55 Pavimentação com blocos retangulares de piso

Fonte: <http://www.gai.com.br/> (acessado em 17/06/2011).

O uso de pré-moldados de concreto no mundo começou com a própria história do cimento portland, com blocos, pisos, telhas, etc. Esses elementos têm um forte mercado nas proximidades de grandes centros urbanos e são excelente opção de se proporcionar acréscimo no valor de agregados produzidos localmente. Enquanto uma carga de dez toneladas de agregados custa por volta de R\$500,00, uma carga com o mesmo peso em blocos de concreto pode chegar a R\$5.000,00. Essa diferença entre o valor do insumo e o valor do produto, da ordem de dez vezes, é o que viabiliza a aplicação de resíduos de extração de rochas ornamentais ou resíduos de extração do próprio agregado como insumo na produção de pré-moldados.

Moura et al. (2002) estudaram a aplicação de resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) gerado em uma serraria na confecção de argamassas e lajotas para piso. Através de sedimentação, concluíram que o RCMG possui 77% de fração menor que 0,075mm. Argamassas foram produzidas no traço 1:6, em massa, com substituições de 5% e 10% de areia por RCMG. As resistências obtidas são mostradas na tabela 3.24, na qual se observa, inclusive, um aumento da resistência em função do aumento do teor de finos (na tabela é apresentado o resultado de resistência à compressão de argamassa de referência, sem o rejeito - REF).

Tabela 3-24 Resistências à compressão de argamassas produzidas com RCMG (Moura et al, 2002)

	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS (MPa)		
	Resistência Média (3dias)	Resistência Média (7dias)	Resistência Média (28dias)
REF	9,9	12,1	17,2
RCMG 5%	10,45	13,6	17,6
RCMG 10%	10,8	14,8	17,7

Na figura 3.25, é mostrada a composição química do RCMG usado na confecção de argamassa e lajotas (Moura et al 2002).

Tabela 3-25 Composição química de RCMG usado na confecção de lajotas (Moura et al, 2002)

Composição Química do RCMG	
TEOR (%)	RCMG
SiO ₂	41,70
Fe ₂ O ₃	4,30
Al ₂ O ₃	8,50
CaO	21,00
MgO	2,00
N ₂ O	-
K ₂ O	2,30
TiO ₂	0,29
SO ₃	0,05
Na ₂ O	2,70
Perda ao Fogo	16,80

Gonçalves et al. (2002) estudaram a aplicação do resíduo de corte de granito, como adições nas porcentagens de 10% e 20% em relação à massa de cimento, e concluíram que é viável a aplicação do resíduo na taxa de adição de 10%. O rejeito estudado possuía forma irregular, angulosa e diâmetro médio de 6,74 μm . A composição química e o difratograma de raio-X identificando as fases minerais são mostrados na tabela 3.26 e na figura 3.56.

Tabela 3-26 Composição química de rejeito de corte de granito usado como adição em concretos (Gonçalves et al, 2002)

Compostos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	PF
Teor (%)	59,62	12,77	9,49	4,83	1,96	0,03	5,3	2,72	1,98

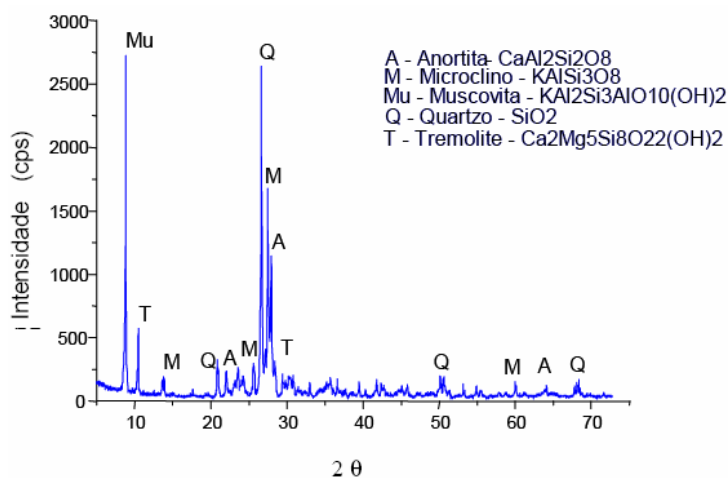


Figura 3-56 Difratograma de amostra de corte de granito usado como adição em concretos (Gonçalves et al, 2002).

ABCP (1978) apud Sousa (2001) apresentou uma tabela com traços utilizados para concreto usados em blocos pré-moldados para alvenaria sem função estrutural (tabela 3.27).

Tabela 3-27 Traços usados na confecção de blocos pré-moldados (ABCP, 1978 apud Sousa, 2001)

MATERIAIS	TRAÇOS (massa por m ³ de concreto)				
	1:10		1:12		1:13
Cimento:agregado	1:5:5	1:6:4	1:6:6	1:6,5:5,5	1:6,5:6,5
Relação água/cimento	1	1	1	1	1
Cimento (Kg)	197	197	171	171	160,5
Agregado total (Kg)	1970	1970	2052	2052	2086
Areia considerando 4 % umidade (Kg)	985	1182	1026	1110	1043
Pedrisco com pó de pedra (Kg)	985	788	1026	942	1043
Água (l)	158	150	130	127	119

Medeiros (1993) apud Sousa (2001) apresentou uma relação entre a resistência à compressão final de blocos usados em alvenaria sem função estrutural, e as faixas de relação cimento/agregados usadas na confecção dos mesmos (Tabela 3.28).

Tabela 3-28 Traços usados na confecção de blocos de concreto e respectivas previsões de resistências à compressão (Medeiros, 1993 apud Sousa, 2001)

Resistência à compressão média aos 28 dias (MPa)	4,5	6,0	8,0	9,0
Relação cimento/agregados (em massa)	1:9 a 1:12	1:8 a 1:10	1:7 a 1:9	1:6 a 1:8

Os blocos pré-moldados de concreto são produzidos em equipamentos chamados “vibro-prensas”, que recebem o concreto fresco e o moldam no formato dos blocos através de formas que fornecem a forma definitiva ao bloco por meio de vibração (Figura 3.57).

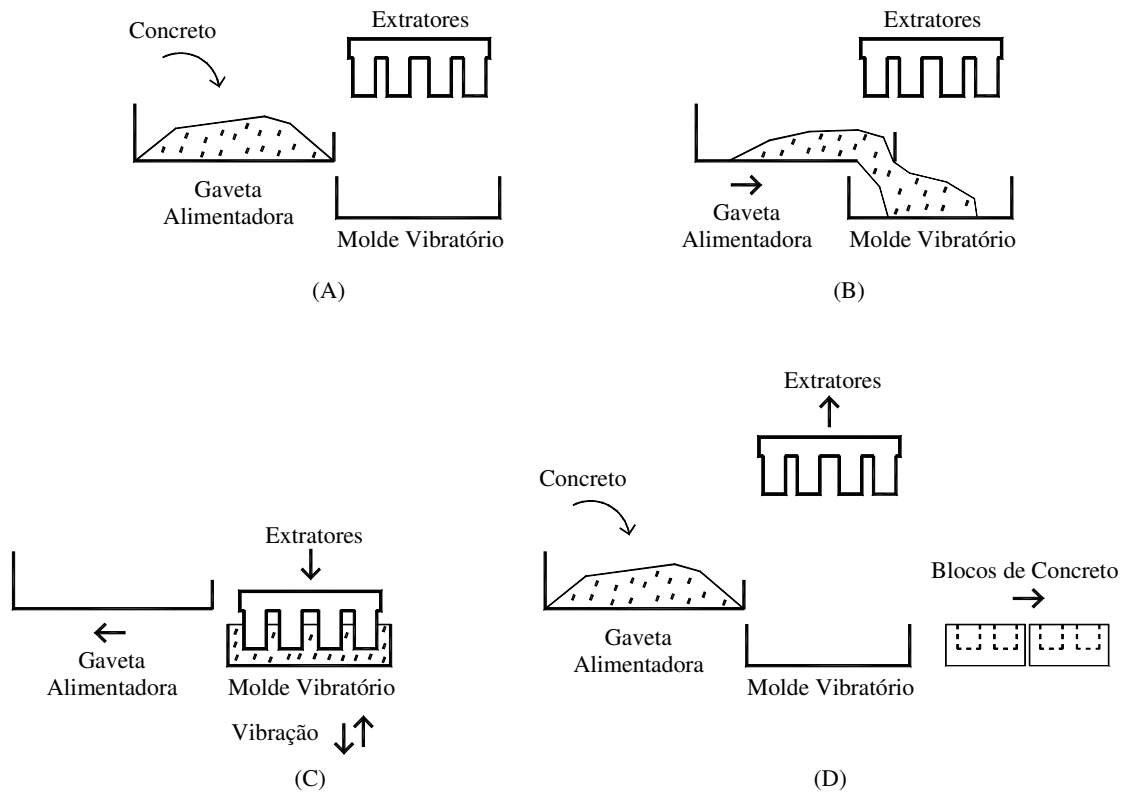


Figura 3-57 Esquema de funcionamento de vibro-prensa.

3.4.5 Agregados Empregados como Base para Pavimentação

Todo sistema de pavimentação tem de ser executado de modo a receber e distribuir as cargas do tráfego para as camadas inferiores, resistindo, assim, aos esforços aplicados sem comprometer a operacionalidade do pavimento durante sua vida útil. Dessa maneira, abaixo do revestimento (asfáltico ou de concreto), são compactadas camadas de solo ou material granular, com altura e resistência tais que suportem a tensão aplicada às mesmas.

As cargas aplicadas pelo tráfego geram tensões no solo. As tensões distribuem-se pelo solo, espreadando-se em ângulos próximos a 45° , o que faz com que quanto mais profunda a camada, menor a tensão aplicada sobre a mesma (devido ao aumento da área de aplicação), como mostrado na figura 3.58.

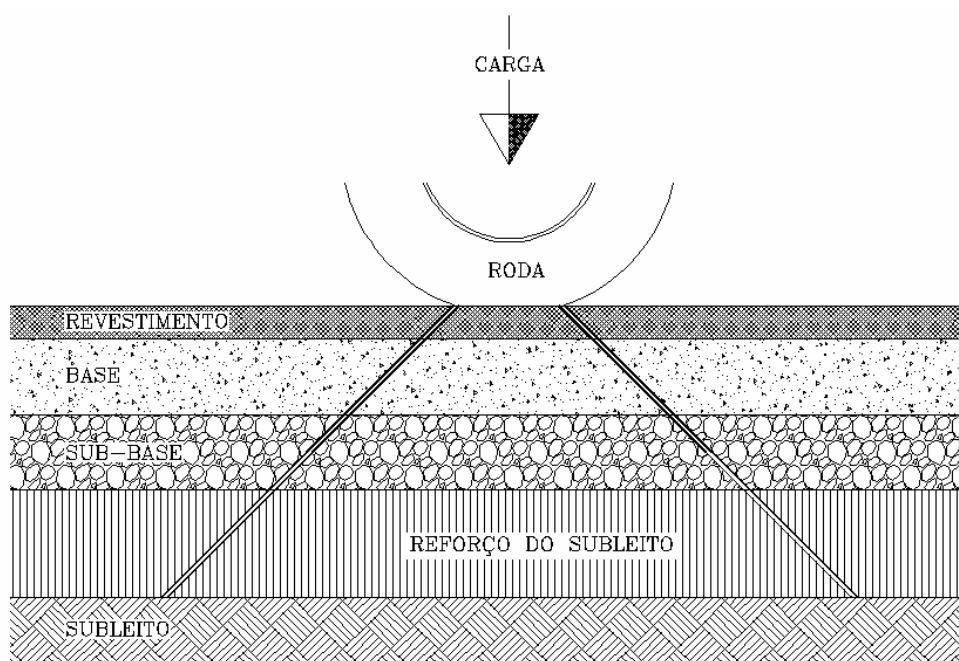


Figura 3-58 Distribuição de carga através das camadas de suporte de pavimento.

Segundo Bernucci et al (2006), os materiais da classe dos agregados e solos mais empregados em pavimentação são:

- *brita graduada simples* - material com distribuição granulométrica bem-graduada, com diâmetro máximo dos agregados não excedendo a 38mm e finos entre 3 e 9% (passante na peneira nº 200);
- *bica ou brita corrida* - Material similar à brita graduada simples, porém com requisitos menos rigorosos, principalmente granulométricos, podendo ser umedecida em pista;
- *macadame a seco ou hidráulico* - Trata-se de camada granular composta por agregados graúdos naturais ou britados, cujos vazios são preenchidos em pista por agregados miúdos e aglutinados pela água, no caso específico do macadame hidráulico;
- *misturas estabilizadas granulometricamente* - estabilizadas por combinação de materiais ou mecanicamente;
- *solo-agregado* - misturas naturais ou preparadas de britas, pedregulhos ou areia predominantemente, contendo silte e argila – material natural (solo) que passa na peneira nº 200;
- *rachão* – Camada pétreia com partículas de dimensão maior que 60mm, com a função de aumentar a capacidade de suporte;
- *solo natural*;
- *solo melhorado com cimento ou cal*.

Na figura 3.59 abaixo são mostrados alguns desses materiais:



Figura 3-59 Alguns agregados usados em pavimentação (Bernucci et al, 2008).

Os autores ressaltam ainda a existência de outros materiais de uso crescente em pavimentação, decorrentes de reutilização e reciclagem:

- escória de alto-forno;
- agregado reciclado de resíduo sólido de construção civil e demolições;
- rejeitos de extração de rochas ornamentais;
- mistura asfáltica fresada;
- etc.

Alecrim (2009) estudou o emprego de rejeito de extração de quartzito foliado em pavimentação. O autor analisou a curva de compactação e o Índice de Suporte Califórnia do material e de misturas agregado-solo e encontrou resultados satisfatórios. Segundo o autor, os quartzitos demonstram a possibilidade de utilização como material granular para uso como base ou sub-base de camadas de pavimentos. Embora a maior quantidade de partículas de quartzito seja de forma cúbica, há uma parcela ainda expressiva de grãos lamelares, alongados. Para algumas aplicações rodoviárias, esses agregados não poderiam ser aceitos devido à forma, porém a alteração no processo de britagem pode melhorar essa característica melhorando a forma das partículas. Outra maneira de empregar os agregados seria utilizá-los em misturas solo-resíduo, em que a forma do agregado não é uma limitação.

3.5 Reação Álcali-Agregado

No concreto, a região interfacial entre o agregado e a pasta composta de cimento e água é conhecida por ser o ponto fraco do sistema, influenciando tanto a resistência quanto a durabilidade do elemento estrutural. Essas propriedades do concreto são determinadas pela quantidade e hidratação dos produtos nessa interface. Reações expansivas, que ocorrem nessa região, são deletérias ao concreto prejudicando sua resistência e, muitas vezes, comprometendo a estrutura. Essas reações ocorrem entre agregados reativos e a pasta de cimento e são chamadas reações álcali-agregado (RAA). No caso particular de o agregado em questão ter alto teor de sílica amorfa, a reação é chamada de reação *álcali-sílica*; já, quando o agregado reativo é uma estrutura cristalina, a reação é chamada de *álcali-silicato*.

As principais variáveis causadoras da RAA, usualmente citadas na literatura, são:

- mineralogia do agregado;
- teor de álcalis no cimento;
- umidade;
- difusividade dos íons pela estrutura;
- estado de insaturação da estrutura;
- fonte e concentração dos íons;
- temperatura;
- presença de pozolana no cimento.

Apesar de haver referências à RAA há aproximadamente 60 anos, ainda não se conhece claramente o seu mecanismo. Até alguns anos atrás, reação álcali-agregado era sinônimo de obras de grande porte e em contato direto com água, como as barragens, mas, nos últimos anos, várias patologias em obras prediais foram identificadas como decorrências do fenômeno. Ainda não se dispõe de mecanismos para combater a reação,

uma vez iniciada. Existem relatos dessa patologia identificada logo após o início da construção e também anos depois da estrutura pronta.

Segundo Kihara (1986) e Hobbs (1988), apud Hasparyc (2005), os minerais envolvidos são alguns tipos de silicatos presentes em rochas sedimentares (argilitos, siltitos e grauvacas), metamórficas (ardósias, filitos, xistos, gnaisses, granulitos, quartzitos, e hornfels) e ígneas (granitos).

Hasparyc (2005) estudou o caso da Usina Hidrelétrica de Furnas (UHE Furnas), cuja barragem foi construída utilizando o quartzito da região como agregado no concreto, tendo apresentado sérios problemas de RAA. A autora concluiu que o quartzito em questão é um agregado com grande potencialidade reativa. Os minerais responsáveis pela sua alta reatividade são os cristais de quartzo bastante tensionados com contatos suturados, e os grãos de quartzo estirados alinhados com as micas em função da intensa deformação tectônica sofrida pela rocha de origem, aliados à fina granulometria da matriz.

A mesma autora fez ensaios de expansibilidade em concretos, usando quartzito como agregado, e constatou altas taxas de deformação. Em ensaios, em que se mede a deformação de barras de argamassa, as deformações máximas admitidas a 16 e 30 dias são respectivamente 0,10 e 0,20%, porém os valores encontrados foram 0,24 e 0,39%, e, mesmo assim, após os 30 dias, as deformações não cessaram.

Silva (2000) estudou o aproveitamento do rejeito de quartzito da região de Pirenópolis (GO) em várias aplicações, analisando, inclusive, o caso do aproveitamento do mesmo como agregado para concreto. Concluiu que dois dos quartzitos estudados (chamados de quartzito verde e quartzito branco) são tendenciosos à reatividade química, porém ressalta o caso da Usina Velha, antiga usina hidrelétrica desativada, construída há várias décadas no rio das Almas. Sua estrutura de concreto, usando quartzito como agregado, permanece até hoje em boas condições, mesmo estando em meio propício à ocorrência de patologias ligadas à reação álcali-agregado.

Pinheiro (2003) apresentou o caso da ponte do Rio Turvo, em serviço há mais de trinta anos, que, há tempos, vem apresentando problemas sérios de deteriorização. Os agregados usados no concreto são quartzitos (figura 3.60).



Figura 3-60 Trincas características de ocorrência de R.A.A (Pinheiro, 2003)

Segundo Monteiro et al (1997), uma estrutura mais densa, como o quartzo, apresenta menor reatividade que estruturas menos densas de minerais silicatados. Os autores estudaram adições minerais como escória, cinzas volantes e pozolanas em cimentos com o objetivo de reduzir a reação expansiva. Foram feitos ensaios de expansibilidade com corpos de prova moldados com quartzito como agregado e cimento com variadas taxas de pozolana, cinza volante e escória. Os resultados são ilustrados na figura 3.61. Aumentos nas taxas de adição de pozolâna (*pozzolan*), cinza volante (*fly-ash*) e escória (*slag*) diminuem, consideravelmente, as deformações ao longo do tempo.

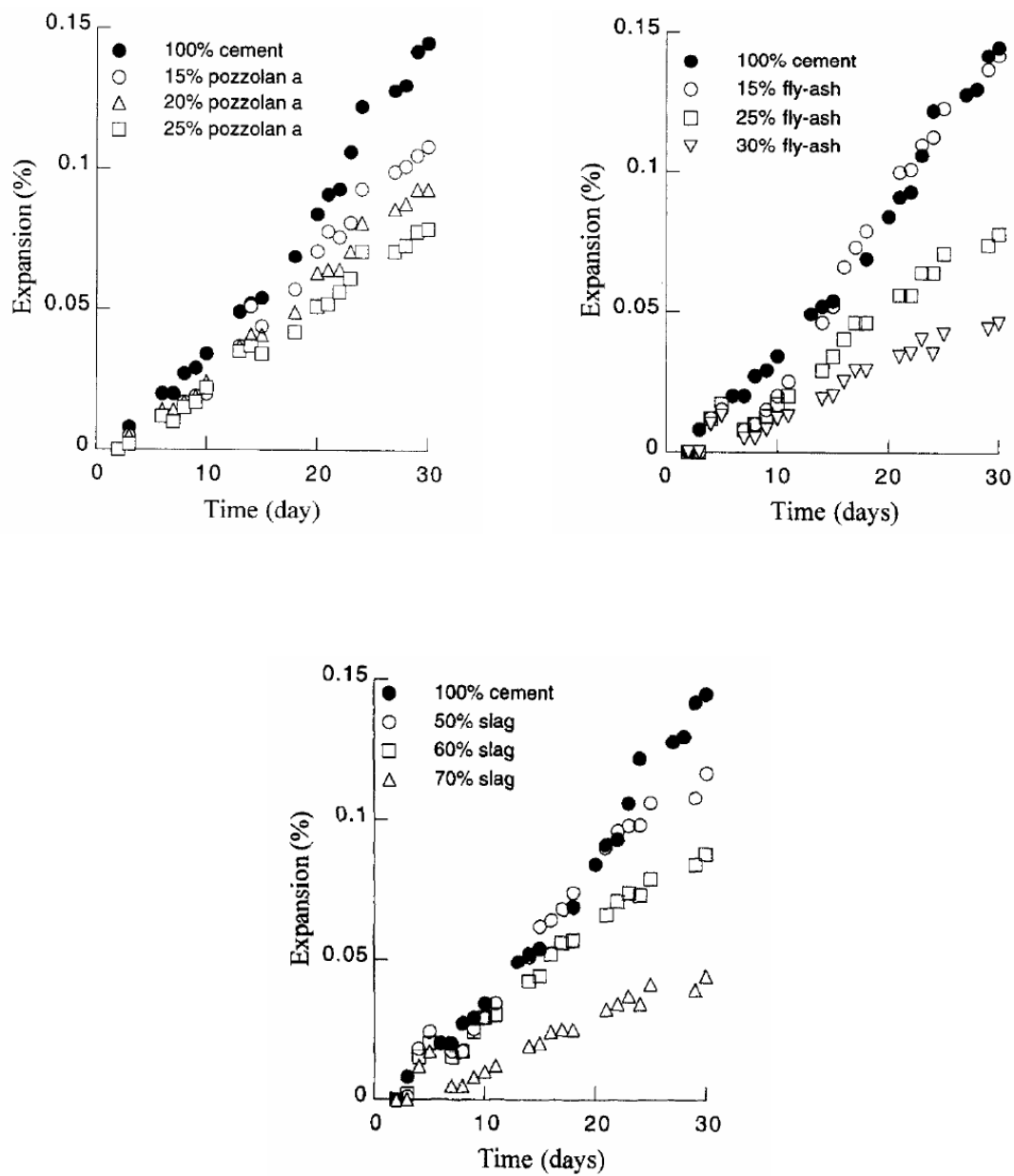


Figura 3-61 Expansibilidade de argamassas - cimentos com adições minerais (Monteiro et al, 1997).

4 METODOLOGIA

Nesse capítulo, são apresentados os materiais e métodos empregados na realização da parte experimental do trabalho, apresentados sucintamente na tabela 4.1.

Tabela 4-1 Resumo da metodologia utilizada

Etapas		Descrição
Obtenção de amostras	Amostras representativas geradas em britador cônico	Pedrisco → #<6,3mm
		Brita A → 6,3mm<#<12,5mm
		Brita B → 12,5mm<#<19mm
Caracterização	Química	Análise quantitativa de elementos químicos por via úmida
	Mineralógica	Análise qualitativa de minerais por difração de raios-X
	Petrográfica	Descrição petrográfica microscópica por relatório fotográfico
	Granulométrica	Análise granulométrica das amostras
Cominuição	Britagem (Brita B)	Britador de mandíbulas
		Análise granulométrica de produto
		Análise de consumo energético
		Geração de produto para ensaio de moagem
	Moagem (Pedrisco)	Moinho de Bolas
		Análise granulométrica de produto
Análise de geração de finos		
Ensaio Físicos	Absorção de Água	Massa de água absorvida / Massa total do agregado
	Índice de Forma	Cubicidade: Comprimento / Espessura dos grãos
Aplicação: Concreto	Concreto para Pré Moldados	Traços de concreto com rejeito de quartzito como agregado
		Resistências de corpos de prova à compressão
		Relações água/cimento
		Consumo de cimento
Aplicação: Argamassa	Argamassa Industrializada	Traços de argamassa com rejeito de quartzito como agregado
		Duas faixas granulométricas (#<1,2mm e #<2,4mm)
		Resistência à compressão e trabalhabilidade
		Relações água/cimento
		Consumo de cimento
Resistência ao Choque e Desgaste	IDp - Índice de Degradação Proctor	Degradação sofrida pelo agregado compactado em cilindro normalizado após aplicação de golpes com energia constante
	Abrasão Los Angeles	Desgaste sofrido pelo agregado quando colocado em moinho Los Angeles juntamente com carga abrasiva
	Ensaio Treton	Resistência ao choque de amostras submetidas a golpes com energia constante

4.1 Materiais

Trabalhou-se com amostras de uma pedreira piloto, que extrai quartzito na serra da Canastra, mais especificamente na cidade de Alpinópolis - MG. Foram recebidos 09 sacos com amostra, contendo aproximadamente 50 kg cada, sendo três de cada granulometria (brita A, brita B e pedrisco). Encontravam-se misturadas partículas de alta a média sanidade, aspecto opaco a translúcido, com superfícies lisas a ásperas.

O rejeito foi britado em uma planta constituída de um britador de mandíbula e de um britador cônico, montada com objetivo de cominuir quartzito e outras rochas que foram usadas em obras recentes de pavimentação na região. Nessa planta, o material britado foi classificado por tamanho em peneiras de 6,3mm ($\frac{1}{4}$ "), 12,5mm ($\frac{1}{2}$ ") e 19mm ($\frac{3}{4}$ "). O material de granulometria maior que 19mm retornava para a britagem secundária (britador cônico).

O material usado nesta pesquisa constitui-se de amostras representativas de cada um dos três produtos gerados nesta planta:

- pedrisco ($\# < 6,3\text{mm}$);
- brita A ($6,3 < \# < 12,5\text{mm}$);
- brita B ($12,5\text{mm} < \# < 19\text{mm}$).

As amostras foram encaminhadas para os laboratórios, separadas e quarteadas em alíquotas para os variados ensaios.

Em todos os ensaios, o cimento utilizado foi o CII-32, da marca Tupi, e a cal foi a CH III da marca Prata, ambos disponíveis no mercado.

4.2 Métodos

4.2.1 Caracterização

O rejeito de quartzito utilizado neste trabalho foi caracterizado em relação às composições química e mineralógica, utilizando amostras representativas das três faixas granulométricas recebidas (pedrisco, brita A e brita B) blendadas. A caracterização petrográfica foi feita com a brita B, e a análise granulometria foi feita para as três faixas granulométricas em separado.

4.2.1.1 Análise Química

As análises químicas foram feitas por via úmida em uma amostra representativa do rejeito de quartzito; as determinações de SiO_2 e PPC foram feitas por gravimetria; enquanto as demais determinações (Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO e MgO) foram feitas por volumetria (complexometria com EDTA). Foram escolhidas partículas de média e elevada sanidade.

4.2.1.2 Caracterização Mineralógica

A determinação dos componentes minerais do rejeito de quartzito foi feita via difração de raios-X nos laboratórios do DEMIN / UFMG.

4.2.1.3 Caracterização Petrográfica

Selecionaram-se amostras representativas de material britado na faixa granulométrica entre 12,5mm e 19mm (brita B). Em seguida, prepararam-se duas lâminas delgadas polidas com 0,030mm de espessura. As partículas foram divididas por lâmina segundo o grau de sanidade e as cores, conforme tabela 4.2 abaixo:

Tabela 4-2 Características gerais de amostras submetidas à análise petrográfica

Lâmina	Características Gerais da Amostra	Partícula	Cor	Observação
M1	Estado de sanidade médio, aspecto leitoso, opaco e superfície semelhante à de uma lixa.	A	Branca	-
		B	Amarelada	-
M2	Estado de sanidade elevado, com aspecto translúcido nas bordas e superfície lisa.	A	Cinza claro	Bandamento milimétrico
		B	Cinza claro	Aparência maciça
		C	Cinza claro rosado	-

As partículas utilizadas na confecção das lâminas delgadas foram preliminarmente impregnadas com resina epóxi, tingida com pigmento azul, para evidenciar fraturas e poros.

As observações foram feitas com microscópio petrográfico polarizante para observações tanto em luz transmitida como refletida, da marca LEICA, modelo DMEP com sistema de captura de imagens.

4.2.1.4 Análise Granulométrica

Os ensaios laboratoriais para determinação de distribuição granulométrica foram feitos segundo a norma ABNT NBR NM 248 / 2001 (Agregados – Determinação da composição granulométrica). As análises granulométricas das amostras de pedrisco, brita A e brita B foram feitas usando as seguintes peneiras: 31.5mm, 25mm, 19mm, 12.5mm, 9.5mm, 6.3mm, 4.65mm, 2.36mm, 1.18mm, 600µm, 300µm, 150µm e 75µm.

4.2.2 Britagem

Os ensaios de britagem foram feitos no laboratório de tratamento de minérios do departamento de Engenharia de Minas (DEMIN) da UFMG. Foi usado um britador de mandíbulas acionado por motor monofásico (127 volts), com regulagem de abertura de mandíbulas (figura 4.1).



Figura 4-1 Fotos do britador de mandíbula usado nos ensaios – DEMIN/UFMG.

Foram britadas três amostras de rejeito de quartzito na granulometria $12,5\text{mm} < \# < 19\text{mm}$ (brita B) com três aberturas de mandíbulas diferentes na condição APF.

As aberturas de mandíbulas do britador na posição APF foram escolhidas segundo observações práticas durante o ensaio. A primeira abertura testada foi de 05 mm. Notou-se certa dificuldade de operação do britador, demandando um tempo maior de beneficiamento e altas correntes. Após esse primeiro ensaio, fez-se o segundo com abertura APF de 10 mm, no qual se verificou grande diminuição na corrente e no tempo de beneficiamento. Visualmente, notava-se também a diferença na distribuição granulométrica do produto, bem mais grosseiro.

Após analisadas as condições APF = 05 mm e 10 mm, analisou-se uma condição intermediária a se testar. Foi escolhida uma abertura de mandíbulas mais próxima de 05 mm, pois, nessa faixa de trabalho, pequenas variações na abertura provocavam maiores variações na corrente, no tempo da operação e na granulometria do produto. Optou-se por escolher, como terceira abertura analisada, a de 06 mm.

Foi instalado um multímetro com datalog em série com a alimentação do britador e foram feitas leituras da corrente durante o ensaio a cada cinco centésimos de segundo.

4.2.3 Moagem

Para os ensaios de moagem, uma alíquota de rejeito de quartzito na granulometria de brita B ($12,5\text{mm} < \# < 19,0\text{mm}$) foi cominuída em britador de mandíbula com abertura da mandíbula de 6 mm na condição APF.

O produto da britagem sofreu corte granulométrico em 4,8mm. O material passante foi usado como alimentação para os ensaios de moagem.

Foram feitos ensaios de moagem com rejeito de quartzito, em tempos específicos (05, 10, 20 e 30 minutos) e depois foram feitas as análises granulométricas dos produtos da moagem em cada tempo. O objetivo desse ensaio é analisar a viabilidade de se moerem amostras de rejeito de quartzito para a obtenção de produtos a serem usados como insumo na produção de argamassas industrializadas.

Os ensaios foram feitos no laboratório de tratamento de minérios do departamento de Engenharia de Minas (DEMIN) da UFMG. A moagem foi feita a seco, com uma porcentagem de bolas de 35%. O moinho usado foi o moinho de bolas mostrado na figura 4.2.



Figura 4-2 Foto do moinho usado nos ensaios – DEMIN/UFMG.

4.2.4 Absorção de Água

Os ensaios de absorção de água foram feitos segundo a norma DNER-ME 195 / 1997 (Agregados – determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo). Segundo essa norma, absorção é o aumento da massa do agregado, devido ao preenchimento dos seus poros por água, expresso como porcentagem de sua massa seca.

Da amostra de rejeito de extração de quartzito recebida na granulometria entre 12,5mm e 19mm (brita B), foram selecionadas partículas representativas do material de grau de sanidade elevado e de grau de sanidade intermediário (na figura 4.3).

As partículas selecionadas foram lavadas e deixadas submersas por 24 horas. Após a submersão, as mesmas foram enxugadas uma a uma, tomando-se o cuidado de evitar a evaporação da água dos poros. Foi então determinada a massa do material na condição saturada superfície seca (B).

Após secagem em estufa até constância da massa, foi determinada a massa do material seco (A). A absorção (a) é determinada pela equação abaixo:

$$a = \frac{B - A}{A} \times 100$$



Figura 4-3 Amostras de rejeito de quartzito de grau de sanidade médio (esquerda) e grau de sanidade elevado (direita) submetidas a ensaios de absorção de água.

4.2.5 Índice de Forma

O índice de forma foi determinado segundo determinações da NBR 7809 / 1983 (Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro). Segundo essa norma, índice de forma é a média da relação entre o comprimento e a espessura dos grãos do agregado, ponderada pela quantidade de grãos de cada fração granulométrica que o compõe, em que:

c → comprimento do grão ou maior dimensão possível de ser medida;

e → espessura de um grão ou menor distância possível entre planos paralelos entre si e a direção do comprimento do grão.

4.2.6 Ensaios com Concreto para Pré-moldados

Os ensaios com concreto utilizando o rejeito de quartzito como agregado foram feitos segundo as seguintes normas:

- DNER ME 046 / 1997 (Concreto - Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismático).
- DNER ME 091/1998 (Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos).

A fração usada de rejeito de quartzito foi a fração denominada “pedrisco”, cuja faixa granulométrica se compreende abaixo de 6,3mm.

Como o objetivo era estudar a aplicação do material como agregado para concreto usado em elementos pré-moldados, optou-se por trabalhar com traços comumente usados na confecção destes elementos. Para análise de cada um dos traços quanto sua resistência à compressão, foram moldados e rompidos corpos de prova em moldes cilíndricos de diâmetro igual a 100 mm e altura 200 mm. Os traços estudados são mostrados na tabela 4.3.

Tabela 4-3 Traços e consumos de água empregados nos ensaios com concreto

Traço	Cimento (CP-32)	Agregado (Pedrisco)	Água	
			Volume (ml)	A/C (umid. Agreg. 2%)
A	Unitário	1	3900	0,80
	Consumo (kg)	5,5		
B1	Unitário	1	3700	0,95
	Consumo (kg)	4,5		
B2	Unitário	1	4150	1,05
	Consumo (kg)	4,5		
C	Unitário	1	3600	1,20
	Consumo (kg)	3,5		

Cada traço foi misturado em betoneira com as quantidades de materiais secos (cimento e pedrisco) definidos pela respectiva relação. Definiu-se uma relação água/cimento inicial antes de se realizar a mistura, porém essa relação foi reavaliada durante o ensaio

devido a questões de trabalhabilidade. Buscou-se trabalhar com um valor de abatimento “*slump*” por volta de três centímetros. Os moldes usados e os corpos de prova são mostrados na figura 4.4.



Figura 4-4 Corpos de prova moldados com quartzito como agregado (corpos de prova nos moldes, desmoldados e em cura por imersão)

4.2.7 Ensaio com Argamassa

Argamassas foram preparadas com rejeito de quartzito como agregado, nos traços 1:2:9, 1:1:6 e 2:1:9 (cimento:cal:areia) e com variadas relações água/cimento. O quartzito usado foi obtido do material recebido, denominado pedrisco, que foi submetido a cortes granulométricos nas peneiras 1,2mm e 2,4mm, gerando os produtos cujas distribuições granulométricas são mostradas na figura 4.5.

O pedrisco, após submetido a peneiramento para corte granulométrico em 1,2mm e 2,4mm, apresentou teores de finos ($\#<0,075\text{mm}$) de 28,10% e 21,03%, respectivamente.

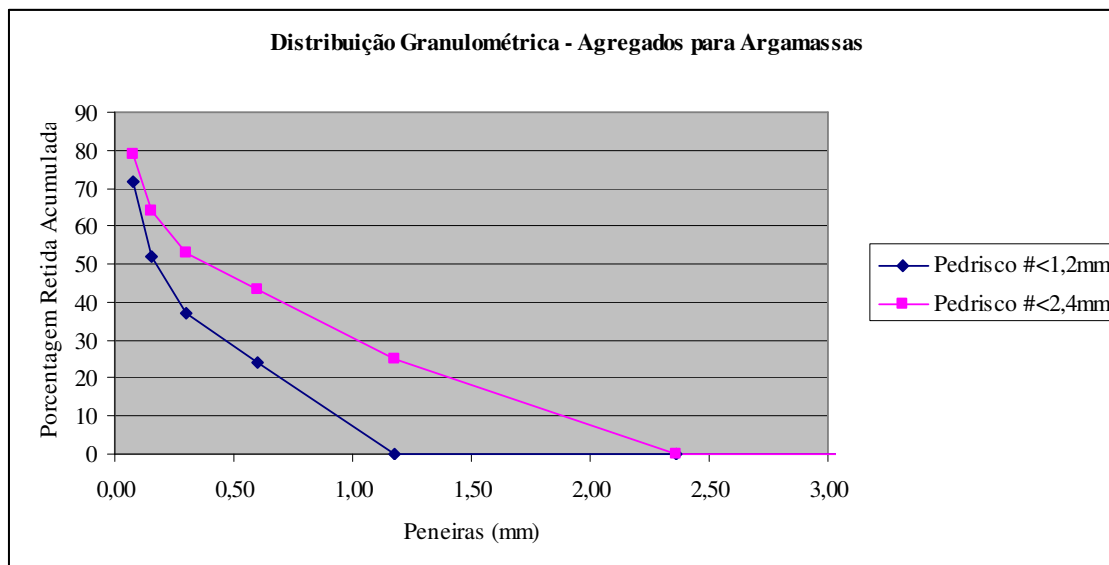


Figura 4-5 Gráfico de distribuição granulométrica de agregados para ensaios de argamassa.

- *Análise quanto à resistência*

Corpos de prova cilíndricos de argamassa, de diâmetro e altura iguais a 50 mm e 100 mm, respectivamente, foram moldados e rompidos sob esforços de compressão axial segundo a norma ABNT NBR 7215 / 1996 (Cimento Portland – Determinação de resistência à compressão). Os moldes e os corpos de prova são mostrados na figura 4.6.



Figura 4-6 Moldes e corpos de prova para ensaio de resistência à compressão em argamassas.

- ***Análise quanto à trabalhabilidade***

Para a avaliação da consistência das argamassas destinadas ao assentamento e revestimento, usou-se o método de ensaio recomendado pela norma NBR 13276 / 2002 (Argamassa para assentamento e revestimento de paredes tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência).

Esse ensaio é realizado enchendo-se um molde tronco cônico padronizado de bases vazadas com argamassa fresca, estando este disposto sobre a mesa de consistência também padronizada com a abertura maior voltada para baixo. Depois de retirado o cone, o volume de argamassa permanece sobre a mesa que promove um movimento sequenciado de queda (30 quedas em 30 segundos). O novo diâmetro da superfície de contato entre o volume de argamassa e a mesa será o índice de consistência (Figura 4.7).

Esse ensaio foi feito para analisar as variações nas trabalhabilidades de argamassas de vários traços em função das granulometrias dos rejeitos utilizados como agregados e dos teores de água adicionados.

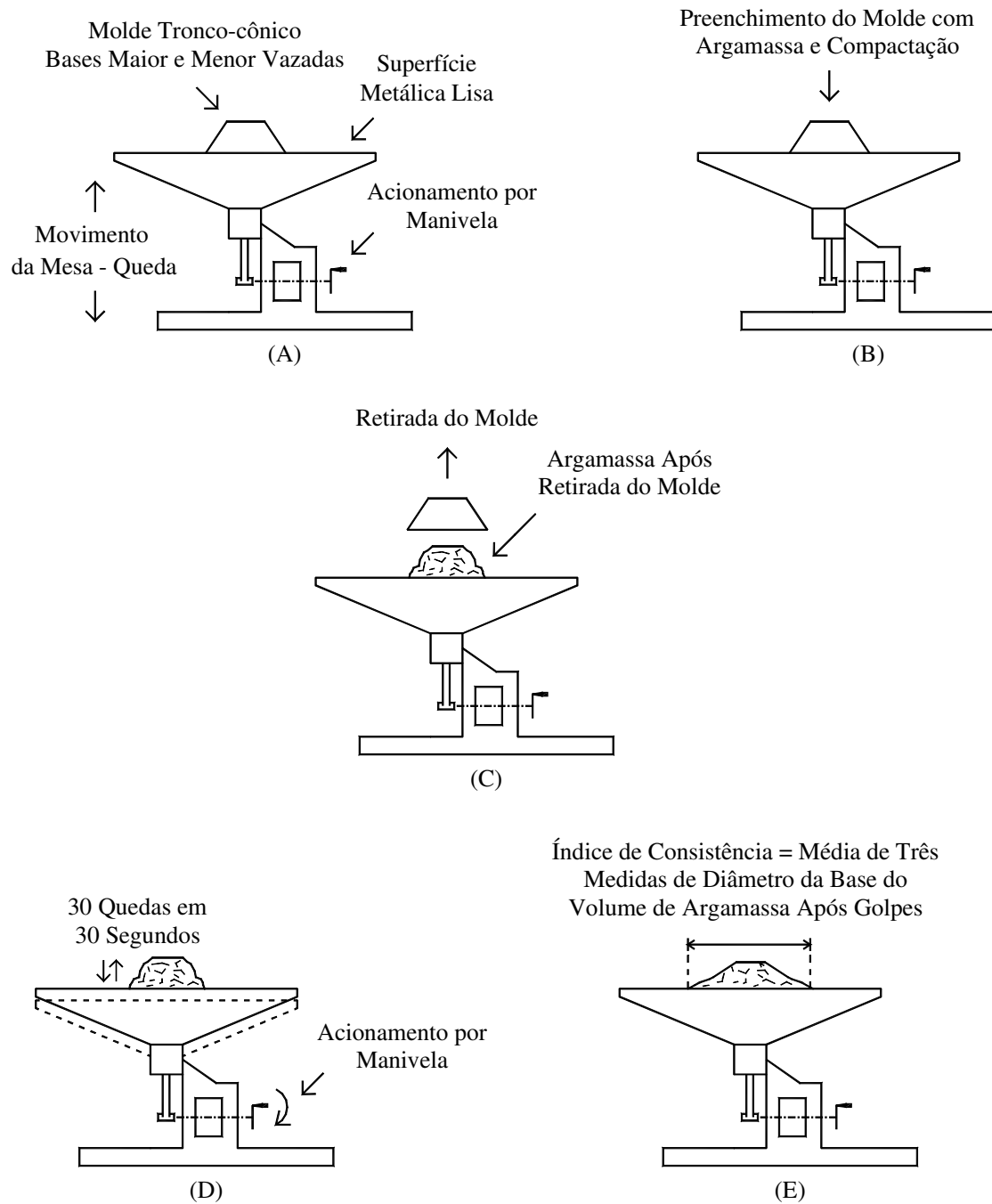


Figura 4-7 Ensaio de índice de consistência em argamassas (mesa de consistência).

4.2.8 Índice de Degradação Proctor - IDp

Foi feito o ensaio de Índice de Degradação Proctor, também chamado de IDp, segundo a norma DNER-ME 398 / 1999 (Agregados – Índice de Degradação após compactação proctor, IDp). O ensaio consiste em compactação de uma amostra de granulometria padronizada colocada em molde cilíndrico para compactação (cilindro padronizado no qual a amostra é condicionada acima de um disco espaçador), utilizando um soquete metálico também padronizado (figura 4.8).

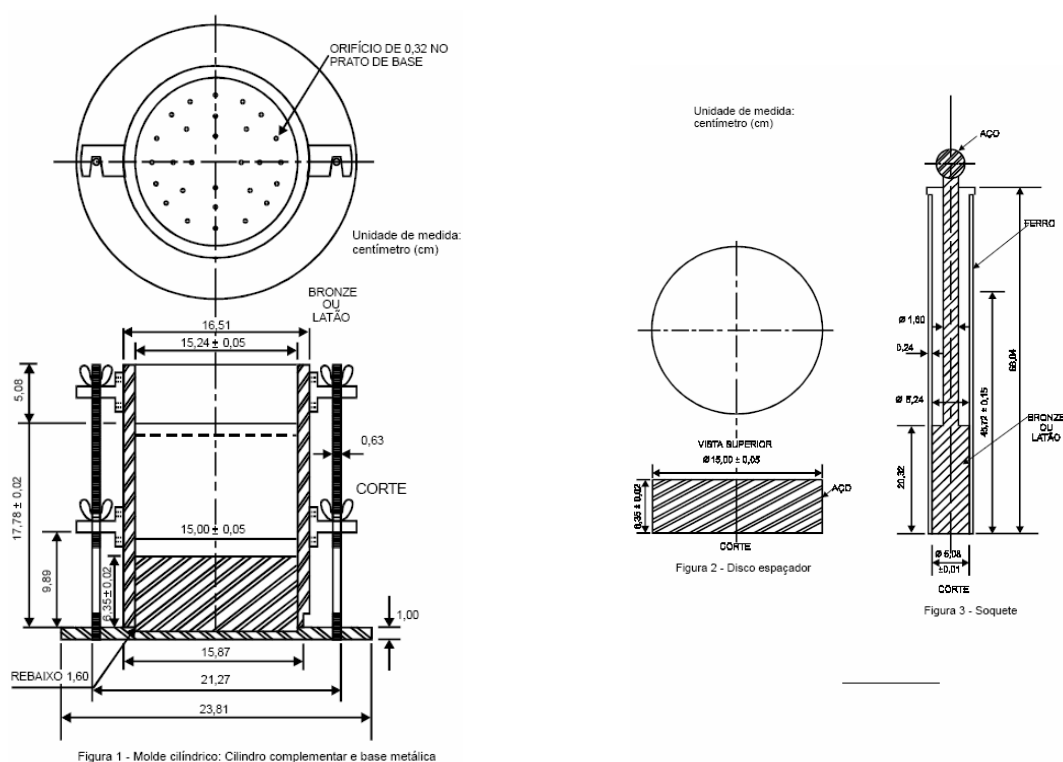


Figura 4-8 Molde cilíndrico para compactação Proctor, soquete e disco espaçador (DNER-ME 398, 1999).

A compactação dá-se em cinco camadas de mesma altura de amostra de material preparada segundo a faixa granulométrica padronizada, acomodada em cilindro padronizado Proctor (tabela 4.4).

Tabela 4-4 Faixas granulométricas de amostra padrão para ensaio IDp (DNER-ME 398, 1999)

Quadro 1 – Granulometria padrão da amostra de rocha		
Peneiras	%	Quantidade (g)
25 mm – 19 mm	15	900
19 mm – 9,5 mm	20	1200
9,5 mm – n° 4	15	900
n° 4 – n° 10	15	900
n° 10 – n° 40	15	900
n° 40 – n° 200	15	900
< n° 200	5	300
Total	100	6000

Após compactação de três amostras preparadas em granulometria específica, o IDp é calculado da seguinte maneira:

- a. calcula-se a porcentagem passante para cada peneira das três amostras;
- b. calcula-se a média para cada peneira;
- c. calcula-se o valor “D” pela diferença percentual entre a média dos corpos de prova e a granulometria padrão original;
- d. calcula-se o somatório dos valores de “D”;
- e. o IDp é calculado pela fórmula abaixo:

$$IDp = \frac{\sum D}{6}$$

A tabela 4.5 abaixo indica a sequência de cálculos.

Tabela 4-5 Cálculo de IDp (DNER-ME 398, 1999)

Peneiras	% passando nas peneiras					
	Granulometria original padronizada	Granulometria após compactação				
		AM 1	AM 2	AM 3	MÉDIA	D
19 mm	85					
9,5 mm	65					
n° 4	50					
n° 10	35					
n° 40	20					
n° 200	5					
$ID_p = \frac{\sum D}{6} = \frac{\quad}{\quad}$						$\sum D = \quad$
Data ___/___/___			Operador _____			

4.2.9 Abrasão Los Angeles

Segundo a norma DNER ME 035 / 1998 (Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”), abrasão Los Angeles é o desgaste sofrido pelo agregado quando colocado na máquina Los Angeles (equipamento padronizado para gerar desgaste na amostra), juntamente com uma carga abrasiva. A máquina Los Angeles submete a amostra, em conjunto com a carga abrasiva a determinado número de revoluções à velocidade de 30 a 33 rpm.

O ensaio pode ser realizado com sete graduações diferentes (tabela 4.6), para que a granulometria utilizada mantenha a representatividade do material a ser usado nas obras que demandaram o ensaio. No caso do material em questão, utilizou-se a graduação B, correspondente à brita 02, pois é uma faixa granulométrica aceita como representativa das características gerais do material e comumente empregada em obras viárias.

Tabela 4-6 Graduações para ensaio “Los Angeles” (DNER-ME 035, 1998)

Peneiras Abertura em mm		Amostra - massa parcial em gramas						
Passando em	Retido em	Grad. A	Grad. B	Grad. C	Grad. D	Grad. E	Grad. F	Grad. G
76	63	—	—	—	—	2500 ± 50	—	—
63	50	—	—	—	—	2500 ± 50	—	—
50	38	—	—	—	—	5000 ± 50	5000 ± 50	—
38	25	1250 ± 25	—	—	—	—	5000 ± 25	5000 ± 25
25	19	1250 ± 25	—	—	—	—	—	5000 ± 25
19	12,5	1250 ± 10	2500 ± 10	—	—	—	—	—
12,5	9,5	1250 ± 10	2500 ± 10	—	—	—	—	—
9,5	6,3	—	—	2500 ± 10	—	—	—	—
6,3	4,8	—	—	2500 ± 10	—	—	—	—
4,8	2,4	—	—	—	5000 ± 10	—	—	—
Massas totais em gramas		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	10000 ± 100	10000 ± 75	10000 ± 50
Nº de rotações do tambor		500	500	500	500	1000	1000	1000

A carga abrasiva consiste de doze esferas de aço ou ferro fundido com aproximadamente 47,6mm de diâmetro, cada uma pesando entre 390 e 445g e tendo o peso total de aproximadamente 5000g.

A máquina “Los Angeles” funciona de maneira similar a um moinho, porém apresenta um sistema interno de pás de arraste do material, como mostrado na figura 4.9.

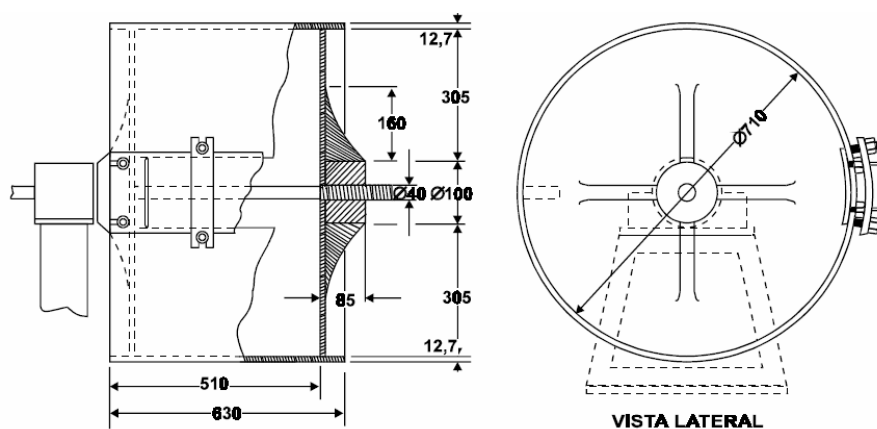


Figura 4-9 Máquina (moinho) padronizada para se realizar o ensaio Los Angeles (DNER-ME 035, 1998).

A abrasão “Los Angeles” do agregado é determinada pela fórmula:

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \times 100$$

Em que:

A_n - abrasão “Los Angeles” com aproximação de 1%;

m_n - massa total da amostra seca, colocada no moinho;

m'_n - massa da amostra lavada e seca, após o ensaio (retida na peneira 1,7mm).

4.2.10 Ensaio Treton

Foi feito ensaio de perda ao choque, cujos procedimentos são determinados pela norma DNER ME 399 / 1999 (Agregados – Determinação da perda ao choque no aparelho Treton).

Perda ao choque Treton é a diferença entre a massa da amostra antes do ensaio e a massa após o ensaio de choque (queda de sólido metálico de altura determinada) em aparelho padronizado (figura 4.10), segundo a fórmula:

$$T = \frac{M_1 - M_r}{M_1} \times 100$$

Em que:

T - perda ao choque (Treton) em porcentagem, em gramas;

M_r - massa do material retido na peneira 1,7mm, em gramas;

M_1 - massa original da amostra, em gramas.

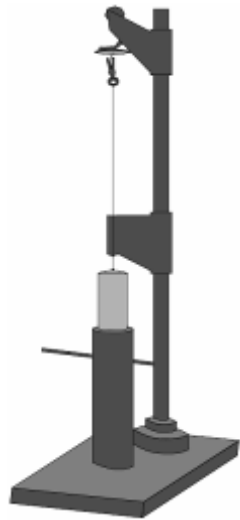


Figura 4-10 Aparelho Treton (DNER-ME 399, 1999).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização

- *Análise Química:*

O resultado da análise química é apresentado na tabela 5.1 abaixo, para amostras de quartzito de graus de sanidade médio e elevado.

Tabela 5-1 Resultado de análise química

Alíquota	%SiO ₂	%Fe ₂ O ₃	%Al ₂ O ₃	%CaO	%MgO	%PPC	Amostra
1	97,9	0,56	0,35	0,13	0,10	0,22	Quartzito - Grau de Sanidade Médio
2	98,0	0,52	0,37	0,13	0,10	0,23	
3	98,5	0,59	0,35	0,06	0,13	0,16	Quartzito - Grau de Sanidade Elevado
4	98,6	0,58	0,36	0,06	0,14	0,15	

Observou-se um alto teor de sílica nas amostras de rejeito de quartzito de grau de sanidade médio e grau de sanidade elevado. A diferença foi de aproximadamente 0,5%. Os teores de óxido de ferro e óxido de alumínio apresentaram valores próximos para os dois tipos de quartzito. Já os teores de óxido de cálcio e perda por calcinação foram maiores no quartzito de grau de sanidade médio, devido ao processo de decomposição instalado.

- *Mineralogia:*

A difração de raios-X indicou a presença dos minerais quartzo e moscovita, como indicado no difratograma da figura 5.1.

- quartzo: SiO_2
- moscovita: $KAl_2Si_3AlO_{10}(OH, F)_2$

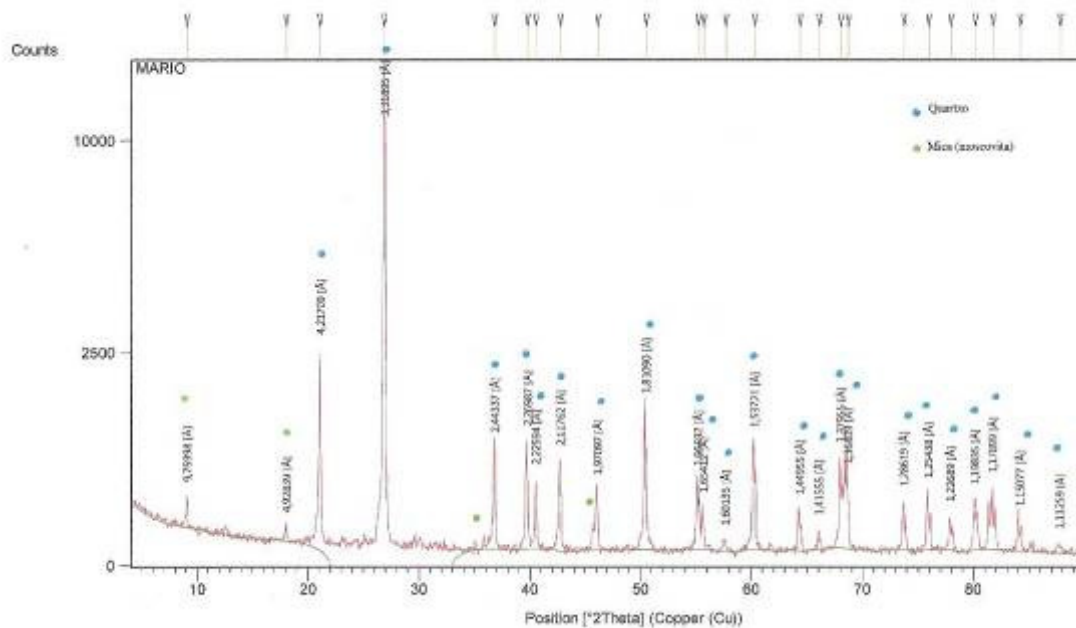


Figura 5-1 Difratoograma de amostra de rejeito de quartzito estudado.

- **Análise petrográfica:**

A análise petrográfica microscópica por relatório fotográfico indicou que as amostras de quartzito tanto de grau de sanidade médio como de grau de sanidade elevado apresentam o quartzo (mineral essencial) predominantemente granular serrilhado, mas também tabular serrilhado, sendo que algumas seções apresentam extinção ondulante. Nas duas condições de sanidade da amostra, a moscovita (mineral acessório) apresentou-se tabular hipidioblástica.

Foi identificado rutilo nas amostras de elevado grau de sanidade que se apresentou prismático idioblástico. Via análise petrográfica, estipulou-se teores de quartzo e moscovita de 98% e 2%, respectivamente. Esses valores coincidem com o resultado da análise química.

Tanto no caso da amostra de grau de sanidade médio como de grau de sanidade elevado, observou-se estrutura de bandamento milimétrico a centimétrico. A moscovita está orientada definindo uma xistosidade. Quanto ao metamorfismo, a granulometria fina do quartzo e a presença de sericita indicam um baixo grau metamórfico. A origem da rocha, para os dois graus de sanidade, é um arenito de baixo teor de argila.

Na figura 5.2 abaixo, vêem-se fotomicrografias de amostras de rejeito de quartzito branco de grau de sanidade médio com comprimento de quadro igual a 0,940mm em mesmo campo. A amostra é constituída por quartzo e moscovita, variedade sericita. A mica está orientada paralelamente a um plano; já o quartzo apresenta seções alongadas. A resina colorida de azul preenche os interstícios entre os grãos minerais, indicando que estão descolados apresentando porosidade interconectada elevada. A fotomicrografia da esquerda é em luz transmitida não analisada; já a da direita é em luz transmitida analisada (polarizadores cruzados).

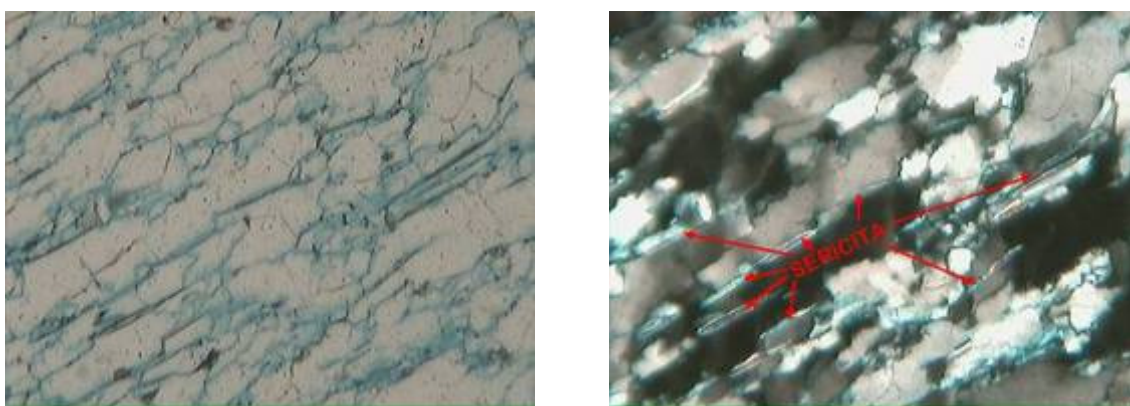


Figura 5-2 Quartzito branco de grau de sanidade médio – Comprimento de quadro de 0,940 mm.

Na figura 5.3, vê-se fotomicrografia de amostra de rejeito de quartzito branco de grau de sanidade médio com comprimento de quadro igual a 0,940mm, em luz transmitida não analisada. A figura mostra os poros resultantes da lixiviação de minerais. A resina colorida de azul preenche os poros e os interstícios entre os grãos minerais, indicando que estão deslocados, o que evidencia um processo de decomposição instalado e porosidade interconectada elevada.



Figura 5-3 Quartzito de grau de sanidade médio com indicação de porosidade – Comprimento de quadro de 0,940 mm.

Na figura 5.4 abaixo, vêem-se fotomicrografias de amostra de quartzito amarelo de grau de sanidade médio com comprimento de quadro igual a 0,470 mm em mesmo campo. À esquerda ilustra-se observação em luz transmitida não analisada, em que a resina colorida de azul preenche os interstícios entre grãos minerais, indicando que estão descolados, o que indica um processo de decomposição instalado e com porosidade interconectada elevada. À direita, aparece observação em luz transmitida analisada (polarizadores cruzados), na qual se vê que algumas seções de quartzo apresentam extinção ondulante, indício de deformação intensa.

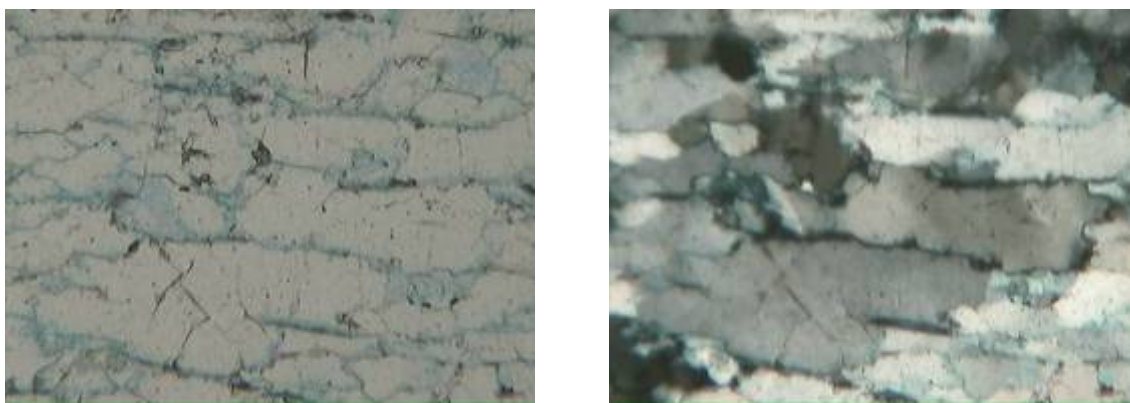


Figura 5-4 Quartzito de grau de sanidade médio – Comprimento de quadro de 0,470 mm.

Na figura 5.5, vêem-se fotomicrografias de amostras de quartzito amarelo de grau de sanidade médio com comprimento de quadro igual a 0,940mm em mesmo campo. À esquerda ilustra-se observação em luz transmitida não analisada apresentando o quartzo com seções alongadas e contorno serrilhado. A resina colorida azul preenche os

interstícios entre os grãos de quartzo. À direita mostra-se observação em luz transmitida analisada (polarizadores cruzados).

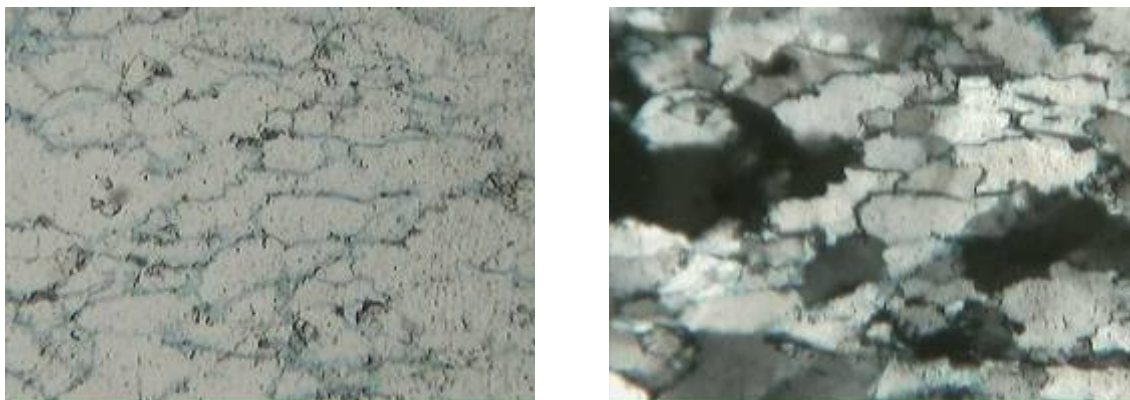


Figura 5-5 Quartzito de grau de sanidade médio – Comprimento de quadro de 0,940 mm.

Na figura 5.6, podem ser vistas fotomicrografias de amostras de grau de sanidade elevado com comprimento de quadro igual a 0,470mm. A fotomicrografia da esquerda é em luz transmitida não analisada, já a da direita é em luz transmitida analisada (polarizadores cruzados).

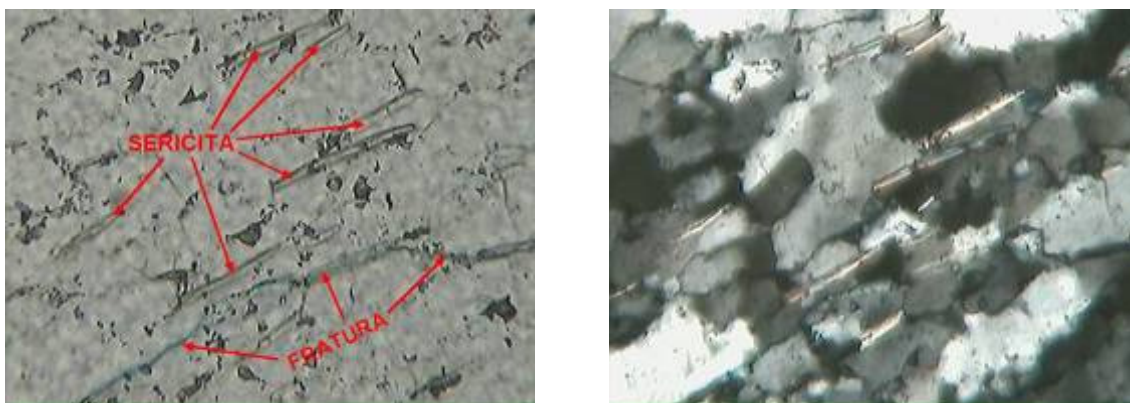


Figura 5-6 Quartzito de grau de sanidade elevado com indicação de presença de sericita e fratura – Comprimento de quadro de 0,470 mm.

Na figura 5.7, podem ser vistas fotomicrografias de amostra de quartzito cinza claro de elevado grau de sanidade. O comprimento do quadro das fotos é igual a **0,940mm**. À esquerda, com luz transmitida não analisada, vê-se uma microfratura preenchida por resina colorida de azul. Os grãos minerais estão colados, indício do elevado grau de

sanidade e da baixa porosidade. Por isso, não há resina entre os mesmos. À direita, vê-se o mesmo campo da fotomicrografia da esquerda, porém com luz transmitida analisada.

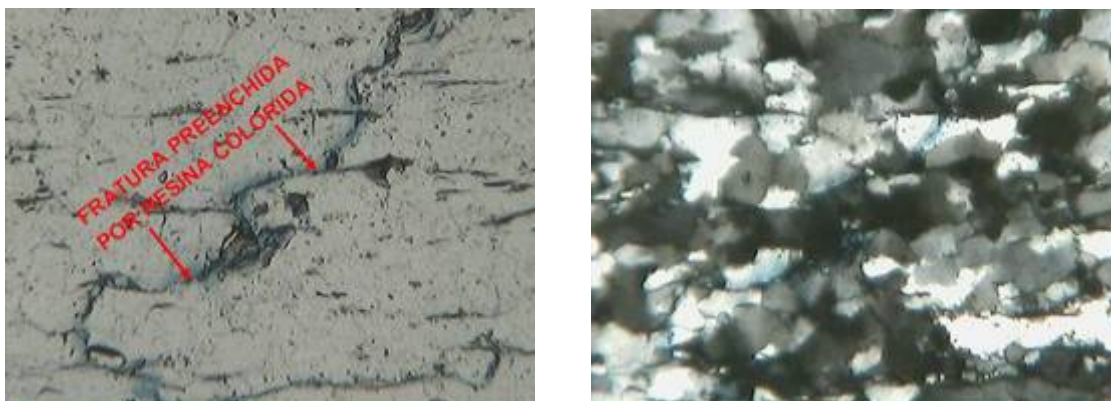


Figura 5-7 Quartzito de grau de sanidade elevado com microfratura – Comprimento de quadro de 0,940 mm.

Na figura 5.6, vêem-se duas fotomicrografias (comprimento do quadro da foto igual a 0,230mm) de amostra de quartzito de elevado grau de sanidade (à esquerda luz transmitida não analisada e à direita luz refletida, não analisada) em que é mostrada ocorrência de rutilo. Vê-se, ainda, que os grãos minerais apresentam-se colados, indicando elevado grau de sanidade e baixa porosidade.

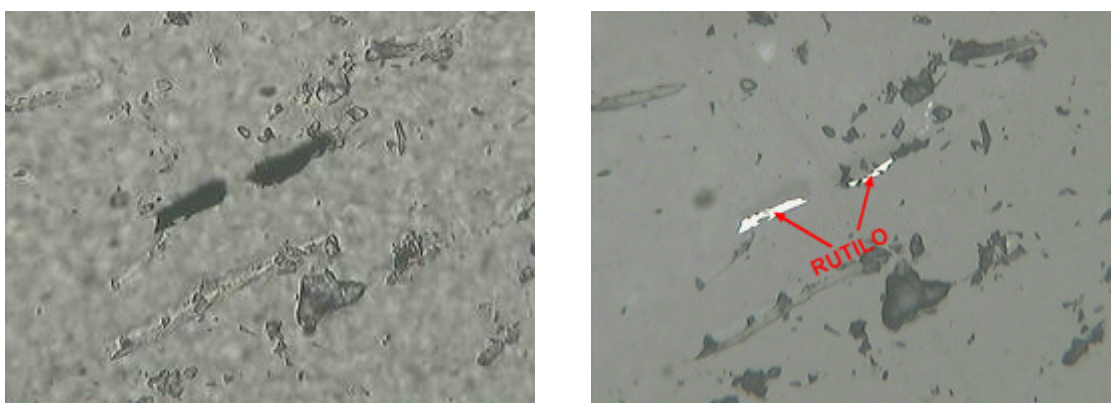


Figura 5-8 Quartzito de grau de sanidade elevado com ocorrência de rutilo – Comprimento de quadro de 0,230 mm.

- **Análise Granulométrica:**

O resultado da análise granulométrica é apresentado na tabela 5.2 abaixo, e o gráfico representando essa distribuição na figura 5.9.

Tabela 5-2 Resultado de análise granulométrica em amostra de pedrisco, brita A e brita B

Peneira (mm)	Porcentagem Retida Acumulada		
	Pedrisco	Brita A	Brita B
31,5	0,00	0,00	0,00
25,00	0,00	0,00	4,69
19,00	0,00	0,00	56,40
12,50	0,00	41,15	99,02
9,50	6,07	84,28	100,00
6,30	25,32	100,00	100,00
4,75	40,95	100,00	100,00
2,36	61,01	100,00	100,00
1,18	70,82	100,00	100,00
0,60	77,84	100,00	100,00
0,30	81,66	100,00	100,00
0,15	85,92	100,00	100,00
0,075	91,80	100,00	100,00
<0,075	100,00	100,00	100,00

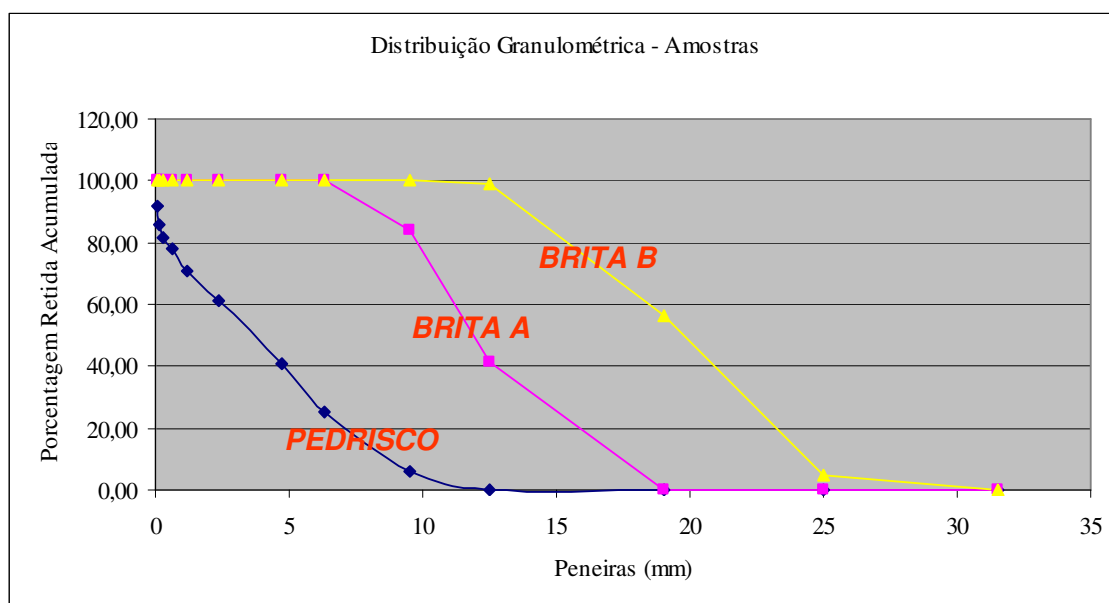


Figura 5-9 Análise granulométrica em amostras de quartzo.

5.2 Cominuição

- **Britagem**

Durante o processo de britagem, o britador apresentou uma corrente de aproximadamente quatro amperes operando em vazio.

O ensaio para a abertura APF 05 mm foi mais demorado devido a um cuidadoso controle de alimentação para que não houvesse travamento do britador. Esse ensaio apresentou altas medidas de corrente. A maioria dos valores localizou-se entre 06 e 12 amperes, como mostrado na figura 5.10 abaixo:

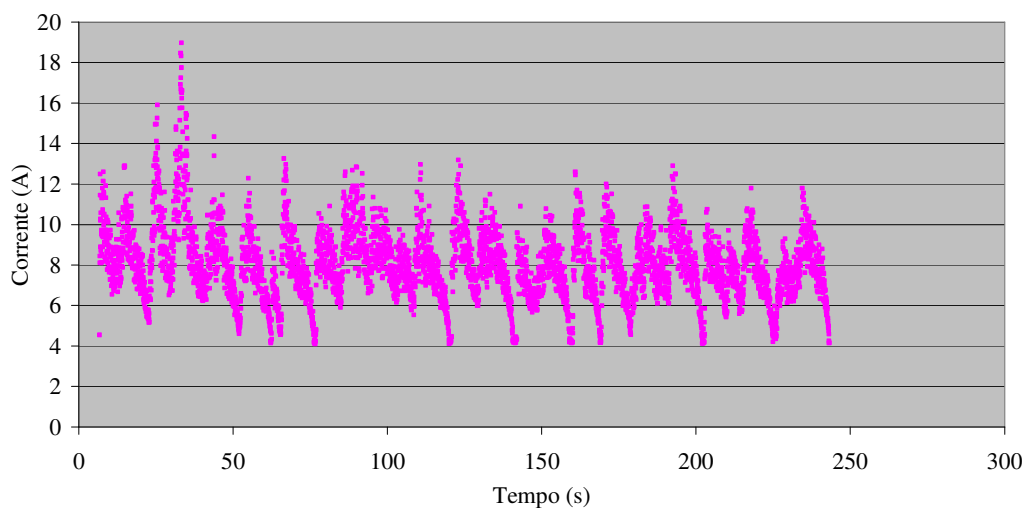


Figura 5-10 Corrente (A) ao longo do tempo em ensaio de britagem – APF 05 mm.

Os ensaios nas condições APF 06 mm e APF 10 mm demandaram menos tempo, porém com correntes diferentes. Para a condição APF 06 mm, a maioria dos valores encontra-se na faixa entre 06 e 12 amperes (figura 5.11), mesma faixa que o ensaio com a abertura APF 05 mm. Já, na condição APF 10 mm (figura 5.12), a maioria dos valores encontra-se entre 04 e 06 amperes.

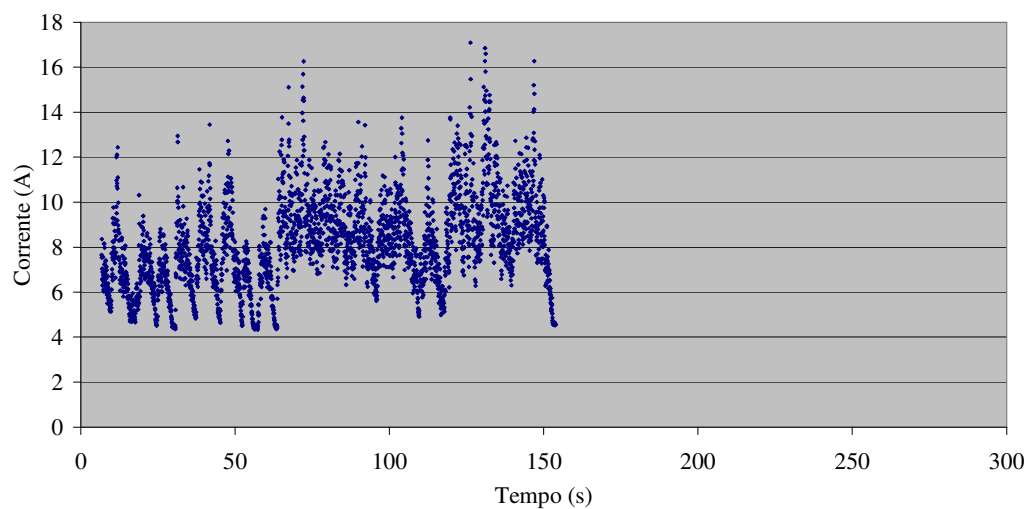


Figura 5-11 Corrente (A) ao longo do tempo em ensaio de britagem – APF 06 mm.

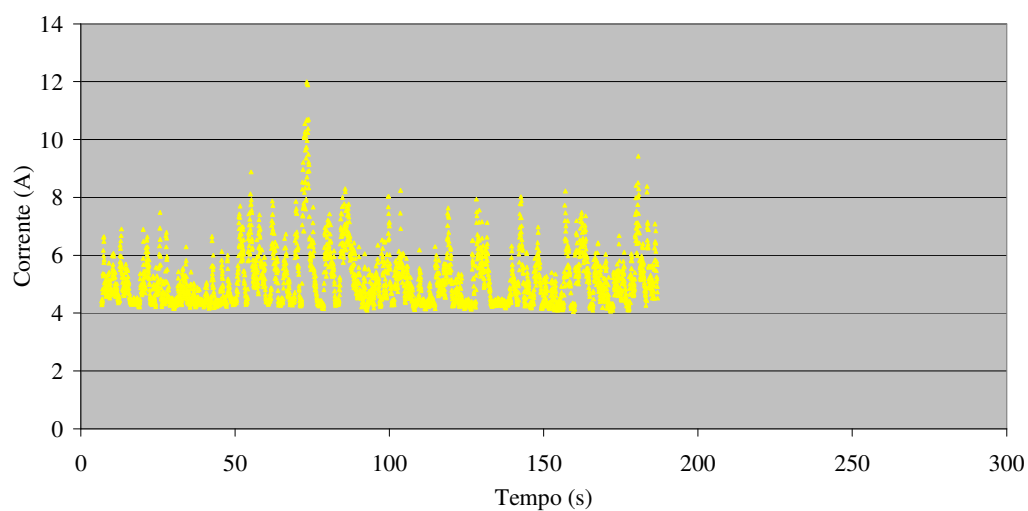


Figura 5-12 Corrente (A) ao longo do tempo em ensaio de britagem – APF 10 mm.

A tabela 5.3 apresenta os valores médios lidos de corrente, o tempo de ensaio, a massa ensaiada, bem como o consumo energético calculado (kWh/t) para a britagem do rejeito de quartzito em cada uma das três condições de abertura de mandíbulas.

Tabela 5-3 Cálculo de consumo energético na britagem do rejeito de quartzito

Abertura APF (mm)	Corrente Média (A)	Tempo (s)	Massa (kg)	Potência (kW)	Energia (kWh)	Energia/ton (kWh/t)
5	8,02	236,50	9,10	1,02	0,0669	7,35
6	8,16	147,15	11,05	1,04	0,0424	3,83
10	5,12	180,20	11,10	0,65	0,0325	2,93

Os dados na tabela foram obtidos da seguinte maneira:

- a. **corrente média (A):** Calculada pela média dos valores obtidos em intervalos de 0,05 segundos e mostrados nos gráficos das figuras 5.10, 5.11 e 5.12.
- b. **tempo (s):** Tempo total para se britar a amostra.
- c. **massa (kg):** Massa da amostra de rejeito de quartzito na granulometria de brita B (12,5mm < # < 19mm) cominuída no ensaio.
- d. **potência (kW):** Sendo a tensão de 127 volts (britador acionado por motor monofásico) e já tendo o valor da corrente média, calcula-se a potência consumida para se britar a massa total da amostra pela fórmula:

$$P_{(kW)} = \frac{V_{(Volts)} \times I_{(amperes)}}{1000}$$

- e. **energia (KW/h):** Valor da potência consumida multiplicada pelo tempo em horas:

$$E_{(kWh)} = P_{(kW)} \times tempo_{(horas)}$$

- f. **energia/massa (KWh/ton):**

$$KWh / ton = \frac{E_{(kWh)}}{Massa_{(ton)}}$$

A análise granulométrica da alimentação e de cada um dos produtos da britagem é mostrada na tabela 5.4 e na figura 5.13 abaixo.

Tabela 5-4 Britagem - Distribuições granulométricas dos produtos para três aberturas de mandíbula e para a alimentação

Peneira (mm)	APF 5mm			APF 6 mm			APF 10 mm			Alim.
	Retido (g)	% Ret.	% Ret. Acum.	Retido (g)	% Ret.	% Ret. Acum.	Retido (g)	% Ret.	% Ret. Acum.	% Ret. Acum.
25,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,69
19,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	56,40
12,5	0,00	0,00	0,00	22,65	2,81	2,81	229,76	34,37	34,37	99,02
9,6	4,22	0,72	0,72	76,37	9,49	12,30	195,08	29,18	63,56	100,00
6,3	28,37	4,85	5,57	203,35	25,26	37,56	138,49	20,72	84,27	100,00
4,8	73,33	12,53	18,10	94,25	11,71	49,27	38,49	5,76	90,03	100,00
2,4	147,03	25,13	43,23	133,71	16,61	65,88	30,83	4,61	94,64	100,00
1,2	83,74	14,31	57,54	80,46	10,00	75,88	12,78	1,91	96,55	100,00
0,6	64,00	10,94	68,48	58,65	7,29	83,16	7,00	1,05	97,60	100,00
0,3	31,11	5,32	73,79	28,00	3,48	86,64	3,07	0,46	98,06	100,00
0,15	31,43	5,37	79,17	26,49	3,29	89,93	2,69	0,40	98,46	100,00
0,075	65,91	11,26	90,43	29,66	3,68	93,62	3,76	0,56	99,03	100,00
< 0,075	56,00	9,57	100,00	51,39	6,38	100,00	6,51	0,97	100,00	100,00
TOTAL	585,14	100,00		804,98	100,00		668,46	100,00		

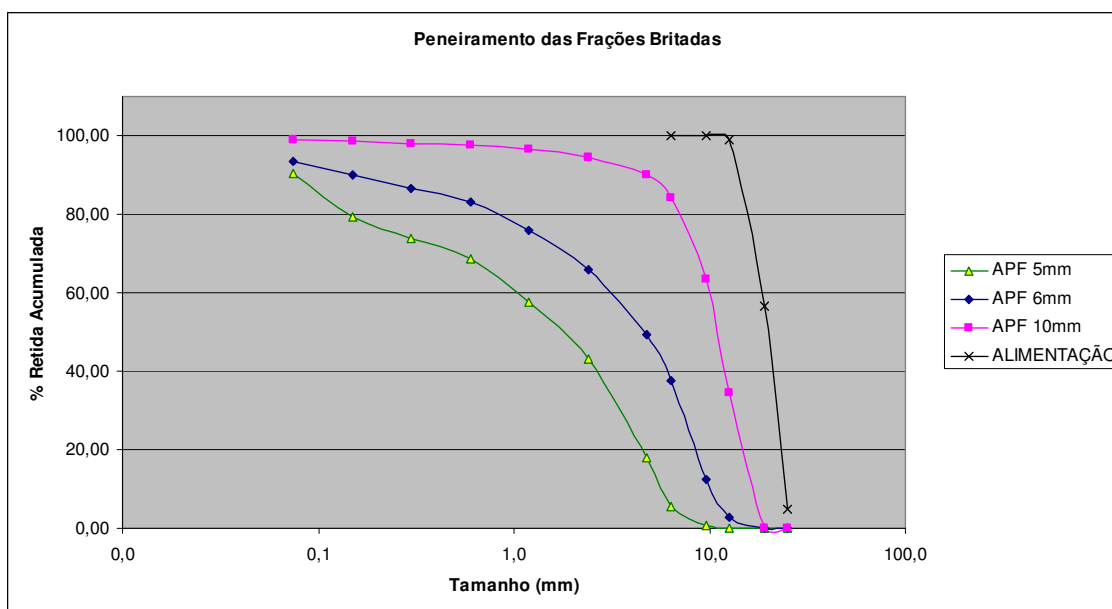


Figura 5-13 Britagem - Gráfico das distribuições granulométricas dos produtos para três aberturas de mandíbula e para a alimentação.

Pela análise da distribuição granulométrica dos produtos, vê-se que a abertura de mandíbula que forneceu produto de britagem mais próximo à granulometria de pedrisco

foi a abertura APF = 6mm. Ao se montar uma planta de britagem para produzir agregados para pré-moldados, essa abertura é a mais adequada gerando um produto com aproximadamente 6,5% de finos passando na peneira 75 μ m, próximo ao teor de finos do pedrisco recebido que é de aproximadamente 8,2%. Neste caso ter-se-ia um consumo energético de aproximadamente 3,8 kW/h, e uma operacionalidade maior do que se optasse por trabalhar com abertura de mandíbulas de 5mm.

No caso de adequação granulométrica de rejeito de quartzito visando à produção de agregados para argamassas industrializadas, os produtos de britagem em abertura de mandíbula APF = 5mm e APF = 6mm não atenderiam às especificações sem que fosse feito um corte granulométrico em 1,2mm ou 2,4mm. Mesmo com o corte, o percentual de material aproveitado seria baixo. Logo, optou-se por estudar a moagem do produto de britagem, após peneiramento, aproveitando-se a fração # < 4,8mm, como opção para a geração de agregado para argamassas.

- **Moagem**

Os resultados dos ensaios de moagem são apresentados na tabela 5.5 e na figura 5.14.

Tabela 5-5 Moagem – Distribuições granulométricas da alimentação e produtos para vários tempos

Peneira (μ m)	Tempo de Moagem									
	Amostra Cabeça		5 Minutos		10 Minutos		20 minutos		30 Minutos	
	Retido (g)	% Ret. Acum.	Retido (g)	% Ret. Acum.	Retido (g)	% Ret. Acum.	Retido (g)	% Ret. Acum.	Retido (g)	% Ret. Acum.
4800	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2380	72,34	21,84	24,99	17,84	18,98	13,07	12,73	9,95	8,93	6,91
1180	90,00	49,01	32,56	41,08	26,90	31,58	12,44	19,68	13,22	17,14
850	38,20	60,54	6,13	45,46	5,34	35,26	2,90	21,95	1,71	18,47
600	22,10	67,21	7,63	50,90	6,98	40,06	3,93	25,02	1,97	19,99
425	20,20	73,31	6,92	55,84	6,85	44,78	4,05	28,18	2,01	21,55
300	12,80	77,18	6,29	60,33	6,38	49,17	5,47	32,46	2,28	23,31
212	16,70	82,22	7,84	65,93	8,88	55,28	8,06	38,76	4,50	26,79
150	11,00	85,54	8,09	71,70	10,15	62,27	10,70	47,13	9,47	34,12
106	13,10	89,49	12,80	80,84	17,19	74,10	19,62	62,47	22,83	51,79
75	11,40	92,94	9,23	87,43	11,86	82,27	15,51	74,59	18,07	65,78
53	9,40	95,77	9,00	93,85	17,77	94,50	21,82	91,65	28,58	87,90
38	5,00	97,28	4,60	97,14	5,89	98,55	8,57	98,35	10,33	95,89
0	9,00	100,00	4,01	100,00	2,10	100,00	2,11	100,00	5,31	100,00
TOTAL	331,24		140,09		145,27		127,91		129,21	

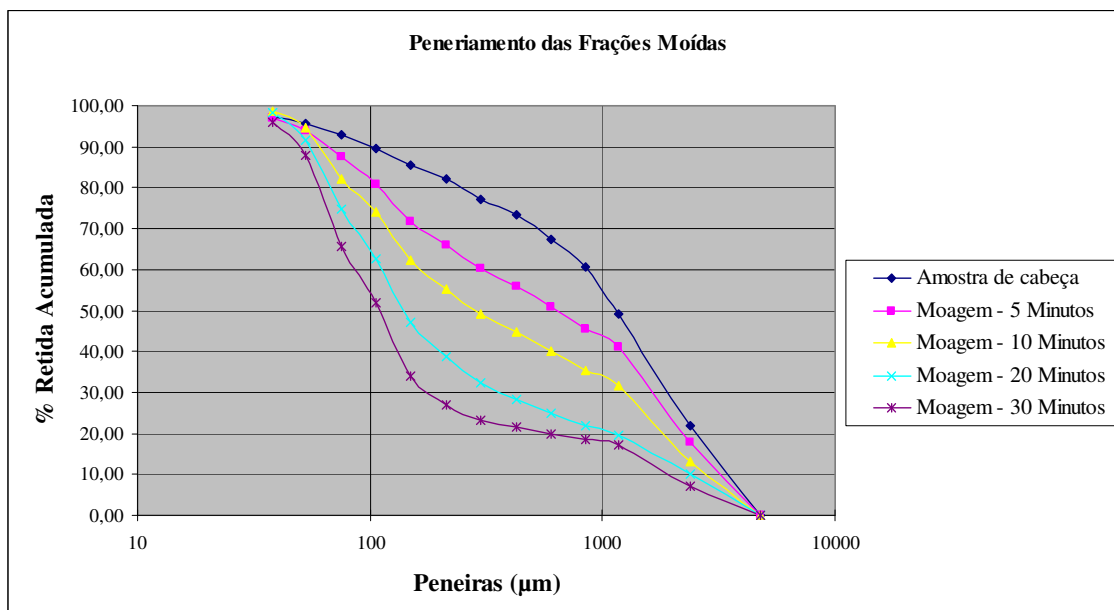


Figura 5-14 Moagem – Gráfico de distribuições granulométricas da alimentação e produtos para vários tempos.

Os resultados dos ensaios de moagem indicam que os tempos de moagem entre 5 minutos e 10 minutos produzem material que atende à especificação para produção de argamassa industrializada. Nesses casos, ter-se-iam teores de finos ($\#<0,075\text{mm}$) de 12,57% e 17,73%, respectivamente. Um tempo de moagem de 20 minutos gerou produto com teores de finos aceitáveis (aproximadamente 25%), porém o consumo energético com a moagem aumentaria devido ao tempo, e seriam necessários moinhos com volumes maiores. Por fim, um tempo de moagem de 30 minutos gerou alto teor de finos (aproximadamente 35% de material passante na peneira 0,075mm).

Apesar de etapas de moagem elevarem os custos da planta (investimentos iniciais com equipamentos, consumo energético e manutenção durante a operação), a opção pode vir a ser viável, pois caso o agregado para argamassa fosse gerado apenas via britagem, ter-se-ia que ser submetido a uma etapa de peneiramento (corte em 1,2mm ou 2,4mm), na qual o material retido não seria empregado na produção da argamassa.

5.3 Utilização como Agregado para Argamassa e Concreto

- *Absorção de água:*

Os ensaios de absorção de água apresentaram os resultados mostrados na tabela 5.6 abaixo.

Tabela 5-6 Resultados de absorção

Características Gerais da Amostra	Amostra	Cor	Absorção
Estado de sanidade médio, aspecto leitoso, opaco e superfície semelhante à de uma lixa.	A1	Branca / Amarelada	0,92 %
	B1	Branca / Amarelada	1,01 %
Estado de sanidade elevado, com aspecto translúcido nas bordas e superfície lisa.	A2	Cinza claro	0,15 %
	B2	Cinza claro	0,12 %

Os valores de absorção para partículas de grau de sanidade médio foram muito maiores do que para partículas de grau de sanidade elevado, como esperado. Além disso, conclui-se que os valores de absorção das partículas de modo geral não interferem nas aplicações propostas para as mesmas.

- *Índice de Forma:*

Os resultados para as análises do índice de forma para a brita A e para a brita B são apresentados na tabela 5.7 abaixo:

Tabela 5-7 Resultados de índice de forma

Amostra	Brita A	Brita B
Granulometria	6,3mm < # < 12,5mm	12,5mm < # < 25,0mm
Número de Unidades Medidas	50	50
Comprimento Médio (mm)	24,14	40,07
Largura Média (mm)	14,62	21,79
Espessura Média (mm)	7,38	11,70
Índice de Forma	3,27	3,42

Os valores de índice de forma indicam que as partículas são lamelares, o que já era esperado pela natureza da formação de partículas do quartzito foliado. Esses valores são altos no caso de o material ser aplicado como base em pavimentação, porém não interferem nas aplicações como agregado para pré-moldados e argamassas, pois, nesses casos, aplica-se o material em faixas granulométricas mais finas.

- ***Ensaio com Concreto para Pré-Moldados:***

Ao se trabalhar com a amostra do pedrisco com agregado para concreto utilizado na produção de pré-moldados, encontraram-se os resultados apresentados na tabela 5.8 abaixo.

Tabela 5-8 Concreto para pré-moldados com rejeito de quartzito como agregado - Resultados de resistências à compressão

Traço	Cimento (CP-32)	Agregado (Pedrisco)	Água		Resistência média à Compressão (Mpa)		
			Volume (ml)	A/C (umid. Agreg. 2%)	7 Dias	14 Dias	
A	Unitário	1	4,5	3900	0,80	13,3	17,8
	Consumo (kg)	5,5	24,8				
B1	Unitário	1	6,5	3700	0,95	9,9	12,5
	Consumo (kg)	4,5	29,3				
B2	Unitário	1	6,5	4150	1,05	9,0	11,9
	Consumo (kg)	4,5	29,3				
C	Unitário	1	8,5	3600	1,20	6,5	9,1
	Consumo (kg)	3,5	29,8				

Os resultados são apresentados graficamente na figura 5.15.

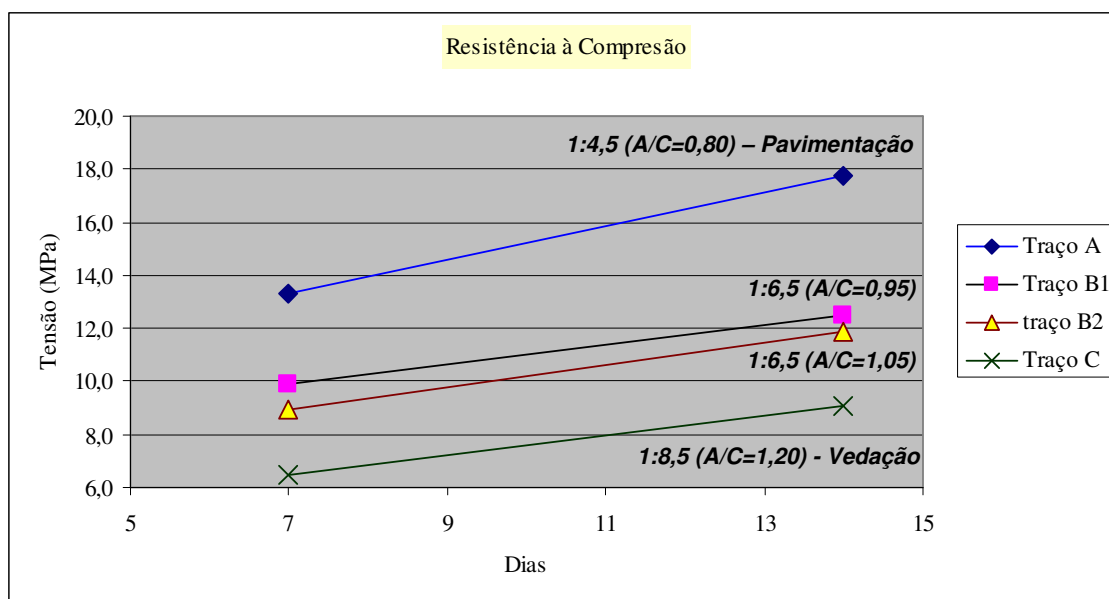


Figura 5-15 Concreto para pré-moldados com rejeito de quartzito como agregado - Análise gráfica dos resultados de resistências à compressão.

Os resultados encontrados nos ensaios com concreto indicaram que, com um traço com baixo consumo de cimento (“Traço C” = 1:8,5) e relação água cimento alta (A/C = 1.20), podem-se alcançar resistências acima de 6 MPa em sete dias. Para o caso de produção de blocos em série, em que o concreto seria lançado em vibro-prensas para moldagem de blocos, poder-se-ia se trabalhar inclusive com um traço um pouco mais fraco (por exemplo 1:10 ou 1:12) mantendo a mesma relação água/cimento. Isso é possível devido à capacidade da vibro-prensa de moldar concretos que apresentem trabalhabilidade menor.

- **Ensaio com Argamassa:**

Na tabela 5.9 abaixo, são apresentados os resultados dos ensaios iniciais de índice de consistência para determinação da quantidade de água para cada uma das granulometrias adotadas para os agregados ($\# < 1,2\text{mm}$ e $\# < 2,4\text{mm}$). O traço usado foi o 1,5:1,5:9 (mesma relação que 1:1:6).

Tabela 5-9 Argamassa com rejeito de quartzito como agregado - índice de consistência X relação água / aglomerante

Ensaio	Água		Índice de Consistência	
	Total (ml)	Água/Aglom.	$\# < 1,2\text{mm}$	$\# < 2,4\text{mm}$
1	498	0,83	-	-
2	540	0,90	-	233
3	570	0,95	-	254
4	600	1,00	232	272
5	630	1,05	247	-
6	660	1,10	267	-

Os resultados são apresentados graficamente abaixo (figura 5.16).

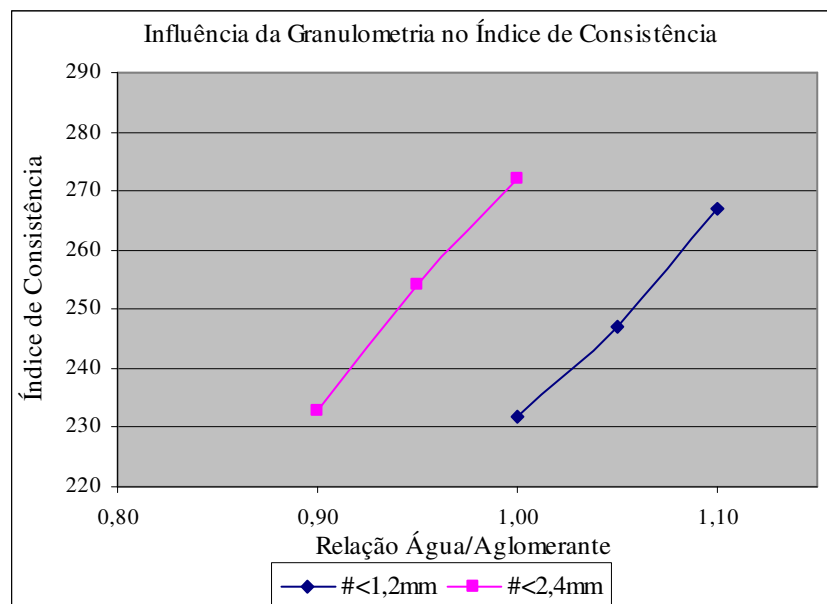


Figura 5-16 Argamassa com rejeito de quartzito como agregado - Variação do índice de consistência X relação água / aglomerante.

Os corpos de prova de argamassa foram rompidos, e os resultados apresentados na tabela 5.10 abaixo:

Tabela 5-10 Argamassa com rejeito de quartzito como agregado - Resultados de ensaio de ruptura variando o diâmetro máximo do agregado

CDP	# < 1,2mm		# < 2,4mm	
	Carga (ton)	Tensão (MPa)	Carga (ton)	Tensão (MPa)
1	0,86	4,4	0,98	5,0
2	0,76	3,9	1,04	5,3
3	0,81	4,1	1,01	5,1
4	0,9	4,6	0,97	4,9
Médias	0,83	4,24	1,00	5,09

O teor de água em argamassas é determinado pela trabalhabilidade necessária (normalmente índice de consistência = 260 cm com variação para mais ou para menos de 10 cm). Existe uma trabalhabilidade ideal para cada teor de adição de cimento na argamassa (determinado pelo traço) e para cada granulometria. No caso do quartzito, mantendo fixo o índice de consistência (IC = 260 cm), a faixa granulométrica mais grosseira (# < 2,4mm) demanda uma relação água cimento menor e gera argamassa de maior resistência.

Com base nos ensaios apresentados acima, foram feitos os ensaios específicos de variação de resistência à compressão e índice de consistência para cada um dos três traços estudados (1:2:9, 1,5:1,5:9 e 2:1:9) e para as duas faixas granulométricas de rejeito (pedrisco #<1,2mm e pedrisco #<2,4mm). Os resultados são mostrados na tabela 5.11 e nas figuras 5.17 e 5.18.

Tabela 5-11 Índices de consistência e resistência à compressão de argamassas em traços variados

Granulometria da Areia	Traço cim:cal:areia	Relação Água/Agglom.	Consistência	Carga (ton)	Tensão (Mpa)	Média (Mpa)
# < 1,2mm	2 : 1 : 9	1,00	252	1,31	6,67	6,1
				1,18	6,01	
				1,11	5,65	
	1,5 : 1,5 : 9	1,00	235	0,88	4,48	3,9
				0,78	3,97	
				0,61	3,11	
	1 : 2 : 9	1,00	216	0,59	3,01	2,7
				0,55	2,80	
				0,46	2,34	
# < 2,4mm	2 : 1 : 9	1,00	306	1,53	7,79	7,0
				1,44	7,34	
				1,18	6,01	
	1,5 : 1,5 : 9	1,00	285	0,99	5,04	4,6
				0,99	5,04	
				0,75	3,82	
	1 : 2 : 9	1,00	261	0,59	3,01	3,0
				0,59	3,01	
				0,57	2,90	

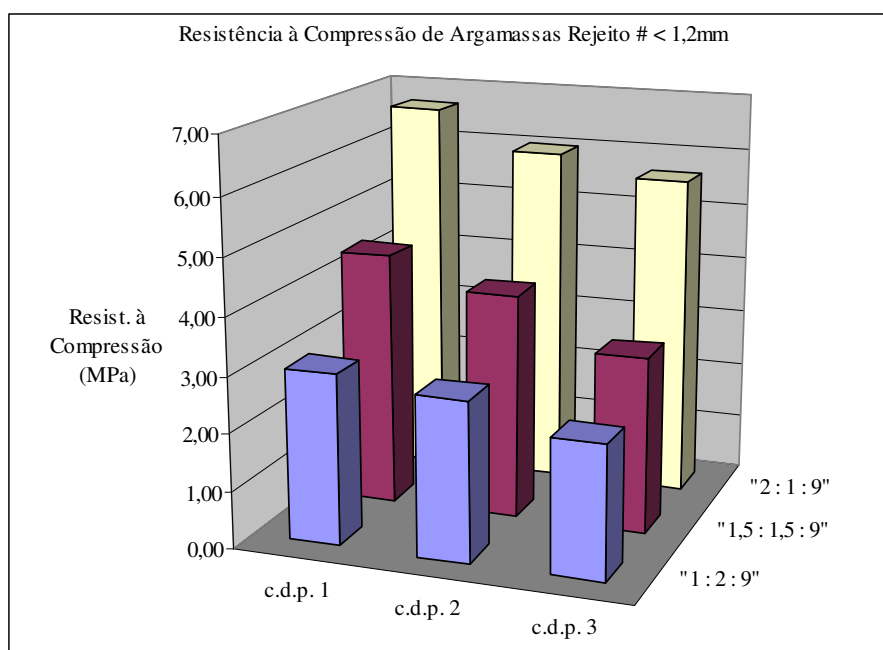


Figura 5-17 Resistência à compressão de argamassas com rejeito de quartzito # < 1,2mm.

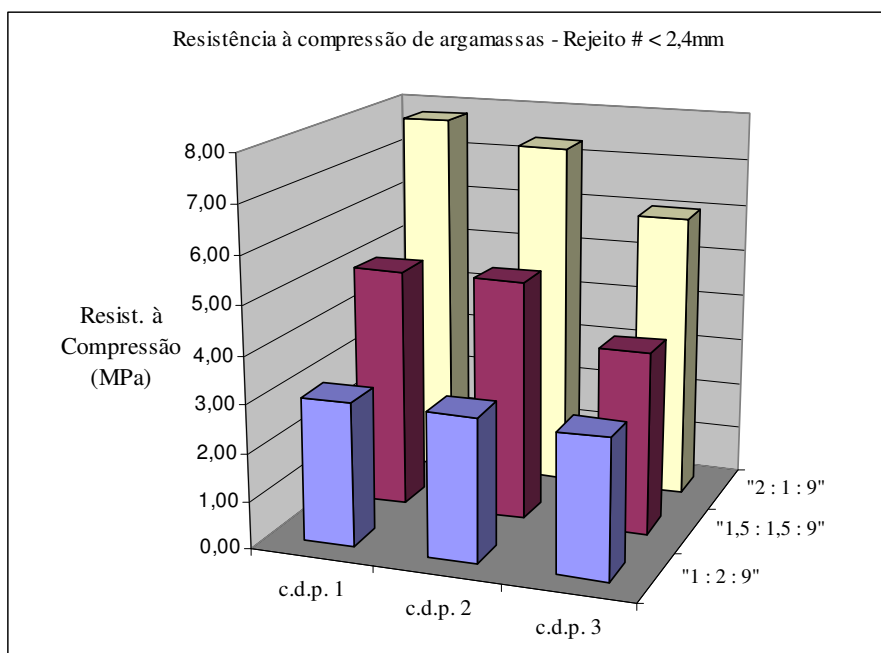


Figura 5-18 Resistência à compressão de argamassas com rejeito de quartzo # < 2,4mm.

Os resultados indicam que as altas porcentagens de finos ($\# < 0,075\text{mm}$) nos agregados não impedem de se conseguir argamassas de boa resistência com teores de água que gerem índices de consistências aceitáveis. A amostra de pedrisco passante na peneira 2,4mm apresenta um teor de material abaixo de 0,075mm de 21,03%, maiores resistências à compressão em todos os traços estudados e menores relações água/cimento para a faixa de trabalho recomendada (índice de consistência $IC=260\text{mm} \pm 10\text{mm}$).

Além das questões referentes às características finais do produto, a produção de argamassa com agregado oriundo da granulometria de pedrisco após corte granulométrico em 2,4mm se torna mais atraente do que o mesmo material após corte em 1,2mm devido a questões operacionais. É melhor trabalhar-se com uma etapa de peneiramento mais grosseira, além do que se aproveitaria uma porcentagem maior do rejeito na granulometria pedrisco (a faixa granulométrica entre 1,2mm e 2,4mm também se tornaria produto).

5.4 Utilização como Base para Pavimentação

- *IDp – Índice de degradação Proctor:*

Os resultados das análises granulométricas de cada uma das amostras submetidas ao ensaio são mostrados na tabela 5.12 abaixo.

Tabela 5-12 Resultados de índice de degradação Proctor

Peneira (mm)	% Pass. Acum. (granulometria padrão)	Granulometria após Compactação						% Pass. Acum. Média	D
		Amostra 01		Amostra 02		Amostra 03			
		Retido (g)	% Pass. Acum.	Retido (g)	% Pass. Acum.	Retido (g)	% Pass. Acum.		
19,0	85	437,9	90,0	299,9	93,1	444,0	89,7	90,9	5,9
9,5	65	792,0	72,0	925,5	71,7	888,5	69,0	70,9	5,9
4,8	50	603,9	58,2	595,8	57,9	591,0	55,3	57,1	7,1
2,0	35	724,0	41,7	700,5	41,7	663,8	39,9	41,1	6,1
0,420	20	757,4	24,4	737,3	24,7	697,2	23,7	24,3	4,3
0,074	5	613,4	10,5	609,5	10,6	580,5	10,2	10,4	5,4
< 0,074	-	458,9	-	459,1	-	437,1	-	-	-
Σ	-	4387,5	-	4327,6	-	4302,1	-	-	-
Valor da média dos seis valores de D:									5,8

A figura 5.19 abaixo mostra as curvas granulométricas da amostra de cabeça (granulometria original padrão) e das amostras após a compactação em cilindro proctor.

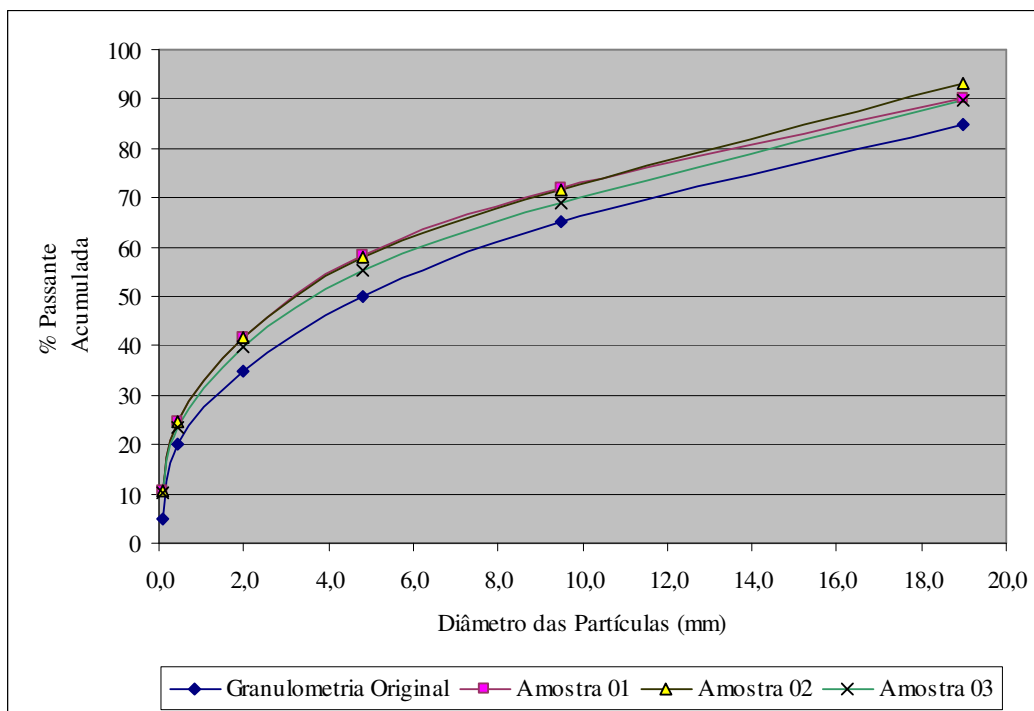


Figura 5-19 Distribuições granulométricas - Compactação Proctor.

Quanto mais degradado o material, maior as diferenças entre as porcentagens passantes acumuladas de cada uma das três amostras geradas e a porcentagem passante acumulada da amostra de cabeça, logo, maior o valor do IDp. Segundo Bernucci et al (2008), o limite máximo de valor de índice de degradação Proctor para que o material possa ser empregado em pavimentação é 6,0; logo o material pode ter essa aplicação.

- **Abrasão Los Angeles:**

O resultado do ensaio de abrasão Los Angeles é apresentado na tabela 5.13 abaixo.

Tabela 5-13 Resultados do ensaio de abrasão Los Angeles

Amostra	01	02	03
Graduação da Amostra	B	B	B
Nº de esferas	11	11	11
Massa total da amostra seca colocada na máquina (g): m_n	5000	4980	4994
Massa da amostra lavada e seca, após ensaio (retida na peneira 1,7mm) em gramas: m_n'	3306	3270	3231
Abrasão Los Angeles (%): A_n	33,9	34,3	35,3
Média dos três valores = Abrasão Los Angeles (%)	35		

Onde:

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \times 100$$

Quanto menor a quantidade de finos gerada durante o ensaio de abrasão, menor o índice de abrasão Los Angeles e, conseqüentemente, melhor o material. O resultado de 35% indica que o material pode ser usado como agregado em pavimentação. Frazão e Paraguassu (1998), apud Ramírio et al (2008), mencionaram que valores de resistência à abrasão Los Angeles devem estar abaixo de 40% para aplicação em lastro ferroviário (condição excelente), e abaixo de 50% (condição razoável a boa) para aplicação como agregados para pavimentação.

- **Ensaio de perda ao choque no aparelho Treton:**

O resultado do ensaio de perda ao choque no aparelho Treton é apresentado na tabela 5.14 abaixo.

Tabela 5-14 Resultados do ensaio de perda ao choque no aparelho Treton

Ensaio	01	02	03
Nº Fragmentos	20	20	20
Masa original da amostra (g): M₁	135,38	130,51	143,24
Massa do material retido na peneira 1,7mm (g): M_r	108,91	101,02	114,2
Perda ao Choque (%)	19,6	22,6	20,3
Média dos Três Valores (%) = Perda ao Choque	21		

Onde:
$$T = \frac{M_1 - M_r}{M_1} \times 100$$

Quanto menor a geração de finos durante a aplicação do choque, menor é o valor da perda ao choque. Frazão e Paraguassu (1998), apud Ramírio et al (2008), mencionaram que valores de perda ao choque Treton inferiores a 20% indicam um material excelente. Entre 20 e 25%, o material é considerado bom. Já a perda ao choque entre 25 e 30% é considerada razoável.

6 CONCLUSÕES

- A descrição petrográfica (brita B) indicou que o rejeito de quartzito é uma rocha com teor de sílica próximo a 98% (confirmado pela análise química), média a alta sanidade. O material apresentou média absorção em partículas menos sãs e baixa absorção em partículas de sanidade elevada (confirmado pelo ensaio de absorção).
- A descrição petrográfica (brita B) indicou fraturas no material oriundas do processo de britagem, ao qual a amostra havia sido submetida (seguindo preferencialmente o plano de orientação da mica). Além disso, ensaios de índice de forma indicaram partículas alongadas. Isso indica necessidade de uma etapa de britagem secundária ou terciária com britador cônico para eliminação das micro-fraturas e melhoria no índice de forma das partículas.
- O alto teor de sílica cristalizada é indício de tendência do agregado a gerar a reação álcali-agregado. Caso usado na produção de pré-moldados ou argamassa, recomenda-se o uso de cimentos com alto teor pozolânico ou adições minerais (disponíveis comercialmente).
- Ao se aplicar o rejeito de quartzito como agregado em pré-moldados, a distribuição granulométrica recomendada é a mais próxima possível à de pedrisco ($\# < 6,3\text{mm}$). Para se atingir essa faixa granulométrica, recomenda-se utilizar britador de mandíbulas operando com abertura da mandíbula na condição APF de 6 mm, o que acarretaria um consumo de aproximadamente 4 kW/h em circuito aberto, sem etapas de remoagem. Isso evita a etapa de peneiramento, o que ajuda a viabilizar financeiramente empreendimentos que utilizem o rejeito.
- O circuito supracitado seria susceptível a pequenas regulagens na abertura do britador adequando-se a granulometria do produto gerado à melhor condição de aplicação.

- Utilizando o rejeito de quartzito na granulometria de pedrisco como agregado, podem ser produzidos pré-moldados em várias faixas de resistências e absorção e água.
- Para a aplicação como agregado em argamassas industrializadas, pode-se usar o rejeito de quartzito na granulometria de pedrisco submetido ao corte granulométrico de interesse (#1,2mm ou #2,4mm). O produto deste corte ainda se apresenta com altos teores de finos ($\#<0,075\text{mm}$), porém os resultados dos ensaios com argamassas feitos nestas condições foram satisfatórios. Caso opte-se por trabalhar com agregados para argamassas com menor teor de finos, pode-se usar o produto de moagem, após peneiramento.
- A granulometria encontrada após cominuição em uma única etapa em britador de mandíbulas (APF = 5 mm) ainda é grosseira para aplicação em argamassa sem ser feito um corte granulométrico. Quando o material britado (APF = 5 mm) é moído por 05 ou 10 minutos, já se apresenta com granulometria adequada para ser usado como agregado em argamassa, com teor de finos ($\#<0,075\text{mm}$) de 12,5% e 17,7%, respectivamente.
- Os resultados dos ensaios de abrasão Los Angeles, impacto no aparelho Treton e Índice de degradação Proctor indicaram que o material pode ser usado como base em pavimentação. Houve ressalva apenas à falta de cubicidade do material.

Um resumo das conclusões em relação às aplicações propostas é apresentado no quadro I.

Quadro I Resumo das conclusões gerais

Produto	Investimento Inicial (Relativo ao valor do agregado)	Insumos Adicionais	Limitação Técnica	Mercado	Expectativa
Agregado para Argamassa Industrializada	<i>Alto</i> Instalações de britagem, moagem e classificação de material fino, mistura e ensacamento	<i>Cimento</i>	<i>Não</i>	<i>Geral</i> Produto de maior valor agregado viabiliza transportes a maiores distâncias	<i>Boa</i>
Agregado Graúdo para Concreto	<i>Baixo</i> Instalações de britagem e classificação de material grosseiro	-	<i>Sim</i> Restrição à R.A.A.	<i>Local e geral</i> Produto de baixo valor agregado	<i>Aplicação não recomendada</i>
Agregado para Pré-Moldados	<i>Médio</i> Instalações de britagem e classificação de material grosseiro, concretagem em vibro-prensa e cura	<i>Cimento</i>	<i>Não</i>	<i>Geral</i> Produto de maior valor agregado viabiliza transportes a maiores distâncias	<i>Ótima</i>
Agregado para Pavimentação	<i>Baixo</i> Instalações de britagem e classificação de material grosseiro	-	<i>Não</i>	<i>Local e específico</i> Depende de investimentos locais em infraestrutura	<i>Razoável</i>

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a. Estudo específico para otimização de lavra de quartzito foliado, com estudo dos métodos de corte e beneficiamento próprios para o caso e sistemática de prospecção e planejamento de trabalhos.
- b. Elaboração de ensaios com argamassas industrializadas adicionando aditivos incorporadores de ar e retardadores de pega utilizados na produção de argamassas industrializadas em substituição à cal hidráulica.
- c. Melhora do entendimento da reação álcali-agregado em concretos com agregados reativos, em especial o quartzito.
- d. Desenvolvimento de uma sistemática de trabalhos, envolvendo etapas de pesquisa bibliográfica, caracterização, ensaios de laboratório, desenvolvimento de projetos executivos e acompanhamento de instalação e “start up” de empreendimentos que gerem produtos cuja matéria-prima seja rejeitos de extração de rochas ornamentais. O objetivo seria agregar valor aos rejeitos gerados na operação de extração de rochas ornamentais de grupos ou cooperativas de pequenos produtores.

8 RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos indicam a viabilidade de aproveitar-se os resíduos gerados na extração do quartzito como insumos na construção civil, mais especificamente como agregados na produção de pré-moldados, argamassas industrializadas e para aplicação como camadas de base em obras de pavimentação.

São vários os impactos positivos no reaproveitamento dos rejeitos em questão. Desde questões ambientais, como preservação de rios e nascentes, preservação de áreas verdes, redução de poluição atmosférica e visual; passando por questões econômicas como diminuição do número de empresas fechadas devido a questões ambientais; até questões sociais, como a geração de novos empregos nas plantas de produção de pré-moldados ou argamassa e maior valorização de produto local.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIROCHAS (Associação Brasileira de Indústria de Rochas Ornamentais) (2009)
Situação mundial e posição brasileira no setor de rochas ornamentais em 2008.
Informe 18/2009. São Paulo.
- ABIROCHAS (Associação Brasileira de Indústria de Rochas Ornamentais)
www.abirochas.com.br – site acessado em 16-06-2011
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7211 –
Agregado para Concreto. Rio de Janeiro, 1983. 5p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7211 –
Agregados para Concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2005. 11p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7215 –
Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro,
1996. 8p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7809 –
Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do
paquímetro. Rio de Janeiro 1983. 3p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 9062 –
Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro 1985.
36p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 9935 –
Agregados - Terminologia. Rio de Janeiro 2005. 4p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 13276 –
Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da
mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro 2002. 3p.

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR NM 248 – Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro 2001. 6p.
- ACCHAR, W., Ramalho, E. G., Fonseca, Y. A., Hotza, D., Segadães, A. M. (2005) Using granite rejects to aid densification and improve mechanical properties of alumina bodies. *Journal of Materials Science*, v. 40, p. 3905 – 3909.
- ACCHAR, W., Vieira, F. A., Hotza, D. (2006) Effect of marble and granite sludge in clay materials. *Materials Science and Engineering*, v. A419, p. 306 – 309.
- AGIM (Agência Goiana de Desenvolvimento Industrial e Mineral) (2002) Difusão de tecnologia mineral para aproveitamento dos rejeitos granulados de lavra de quartzito ornamental na região de Pirenópolis – GO. Convênio nº 008/2001 – MME. SMM/DNPM/AGIM.
- ALECRIM, A. V. (2009) Estudo do resíduo de quartzito foliado para emprego em estruturas de pavimentos. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transporte, Escola Politécnica da USP. São Paulo. 139 p.
- ALMEIDA, S. L. M., Chaves, A. P., Leal Filho, L. S. (2001) Aproveitamento de areia de finos de pedreiras brasileiras para uso em construção civil. Em: Calvo, B., Maya, M., Parra, J. L. *Primeras Jornadas Iberoamericanas sobre “Caracterización y Normalización de Materiales de Construcción”*. Programa CYTED. Madrid.
- ALMEIDA, S. L. M., Silva, V. S. (2005) Areia artificial - uma alternativa econômica e ambiental para o mercado nacional de agregados. Rio de Janeiro, CETEM – Comunicação Técnica elaborada para o “II SUFFIB – Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem”, 05 a 07 de abril 2005, São Paulo-SP.

- ALMEIDA, S. (2006) Lavra, artesanato e mercado do esteatito de Santa Rita de Ouro Preto, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós Graduação em Engenharia Mineral). Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 121p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP (1978) Blocos de concreto pré-moldados sem função estrutural. 6ªed. São Paulo. 8p. (Boletim técnico n.33) apud SOUSA, J. G. G. (2001) Contribuição ao estudo da relação entre propriedades e proporcionamento de blocos de concreto – aplicação ao uso de entulho como agregado reciclado. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil (Faculdade de Tecnologia). Universidade de Brasília. Brasília, DF.
- BARBOSA, M. I. M., Porphírio, N. H. (1995) Caracterização tecnológica de lascas de quartzo. Rio de Janeiro, CETEM – Série Tecnologia Mineral. Rio de Janeiro, 47p.
- BENACHOUR, Y., Davy, C. A., Scoczylas, F. Houari H. (2008) Effect of a high calcite filler addition upon microstructural, mechanical, shrinkage and transport properties of mortar. Cement and concrete research n. 38 p. 727-736.
- BERNUCCI, L. B., Motta, L. M. G., Ceratti, J. A. P., Soares, J. B. (2008) Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros. Petrobrás / ABEDA (Associação brasileira de empresas distribuidoras de asfalto), Rio de Janeiro.
- B.I.A. (Brick Industry Association) (1988) Especificação Normalizada para argamassas de cimento portland + cal para alvenarias de tijolo. Notas Técnicas para a Construção em Tijolos. 11490 Commerce Park Drive, Reston, Virginia 20191 USA. (tradução e edição: Antônio de Borja Araújo, Eng^o Civil I.S.T. Lisboa 2001).

- CALAES, G. D. (2005) Bases para a conciliação da produção de agregados com o desenvolvimento urbano sustentável, programa de capacitação de gestores de empresas mineradores de agregados para a construção civil. CETEC. Extraído de http://www.cetec.br/agregados/plano_agregados.htm em 23-04-2011.
- CAMPOS, A. R., Silva, M. A. R. (2003) Assistência técnica na exploração de quartzito em Pirenópolis (GO). Rio de Janeiro, CETEM – IV Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste, Fortaleza (CE) de 16 a 19 de novembro de 2003.
- CAMPOS, E. E., Ampli Fernandes, L. E. V (2006) Controle ambiental aplicado à produção de agregados, programa de capacitação de gestores de empresas mineradores de agregados para a construção civil. CETEC. Extraído de http://www.cetec.br/agregados/plano_agregados.htm em 23-04-2011.
- CATARINO, L., Sousa, J., Martins, I. M., Vieira, M. T., Oliveira, M. M. (2003) Ceramic products obtained from rock wastes. *Journal of Materials processing Technology*, v. 143-144, p. 843-845.
- CHIODI FILHO, C. (1995) Aspectos técnicos e econômicos do setor de rochas ornamentais. (série estudos e documentos – 28) CNPq/CETEM – Rio de Janeiro. 75p.
- CHIODI FILHO, C. (2008) cadeia produtiva de rochas ornamentais. Seminário nacional prevenção e controle da exposição aos agentes ambientais em marmorarias - da pesquisa à prática - 01 e 02 de julho de 2008 - São Paulo, SP.
- COIMBRA FILHO, C. G. (2006) Relação entre processo de corte e qualidade de superfícies serradas de granitos ornamentais. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Escola de Engenharia de São Carlos / USP, São Carlos, SP. 168p.
- COSTA, A. G.; Campelo, M. S.; Pimenta, V. B. (2001) Rochas ornamentais de revestimento de Minas Gerais - Principais ocorrências, caracterização e aplicações na indústria da construção civil. *GEONOMOS* v. 8 (1), p. 9-13.

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Mineriais / SGB – Serviço Geológico do Brasil (2007). Programa Geologia do Brasil: Levantamentos Geológicos Básicos. Geologia da folha Guapé SF.23-V-B-IV.

DA MATA, P. M. (2003) Indústria de Rochas Ornamentais: Rejeitos x Produção Limpa. Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM/BA. Salvador/BA.

DA MATA, P. M., Vêras, A. M., Correia, D. M. B. (2007) Roteiro básico para pesquisa de rocha ornamental: Modelo aceito pelo 7^o DS/DNPM. Trabalho apresentado no Congresso Brasileiro de Geologia em Aracaju/SE (2006) e no III Congresso Brasileiro de Rochas Ornamentais – Natal/RN (2007)

DE LA SERNA, H. A. (2010) a - Agregados para a Construção Civil. DNPM/SP. Extraído de *www.dnpm.gov.br* em 02/07/2011.

DE LA SERNA, H. A., Rezende, M. M. (2010) b - Agregados para a Construção Civil. Extraído de *http://sindibrita.org.br* em 02/07/2011.

DESCHAMPS, E., Maia Júnior, B., Costa, C. S., Santos, M. G. V., Keller, W. S., Carvalho Filho, C. A., Damasceno, M. A., Pinto, C. L. L. (2002) Controle ambiental na mineração de quartzito - Pedra São Tomé. Segrag editora e gráfica limitada. Belo Horizonte, 204p.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, ME 035 – Agregados - Determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro 1998. 6p.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, ME 046 – Concreto - Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos. Rio de Janeiro 1998. 13p.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, ME 091
– Concreto – Ensaio de Compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro 1998. 6p.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, ME 195
– Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro 1997. 6p.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, ME 398
– Agregados – Índice de degradação após compactação proctor (IDp). Rio de Janeiro 1999. 6p.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, ME 399
– Agregados - Determinação da perda ao choque no aparelho Treton. Rio de Janeiro 1999. 5p.

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral (2006) Anuário Mineral Brasileiro 2006, Parte III – Estatísticas por substâncias.

DUTRA, R. (2006) Rochas ornamentais – Feldspato e quartzo. 2º encontro de engenharia e tecnologia de Campos Gerais, 14 a 18 de agosto de 2006.

FERNANDES, T. M. G.; Godoy, A. M.; Fernandes, N. H. (2003) Aspectos Geológicos e Tecnológicos dos Quartzitos do Centro Produtos de São Thomé das Letras (MG). Geociências, v. 22, n. 2, p. 129-141.

FONTES, M. P. F. (1984) Introdução ao estudo de minerais e rochas. Viçosa, Imprensa Universitária da UFV. 1984, 23p.

FRANKLIN JÚNIOR, I. (2009) Estudo tecnológico em rejeitos de quartzito do Sudoeste de Minas Gerais para utilização como agregado graúdo no concreto. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil (Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG. 142p.

FRAZÃO, E. B., Panorama da produção e aproveitamento de agregados para construção - Programa de capacitação de gestores de empresas mineradoras de agregados para a construção civil. CETEC. Extraído de http://www.cetec.br/agregados/plano_agregados.htm em 23-04-2011.

FRAZÃO, E. B., Paraguassu, A. B. (1998) Geologia do Brasil. In: Oliveira, A. M. S., Brito, S. N. A. (Eds). Geologia de Engenharia, São Paulo, ABGE. Cap.20, p.331-360. 1998 apud RAMIRIO R. F.; Pamplona D. R. P.; Franklin Junior I.; Collares E. G. (2008) Estudo comparativo de rejeitos de quartzito com outros agregados comercialmente utilizados como materiais de construção no sudoeste de Minas Gerais. Ciência et Praxis v. 1, n. 1.

GAI PRÉ-MOLDADOS, <http://www.gai.com.br> (acessado em 16/06/2011)

GOMES, M. A. S. (2000) Redução de impacto ambiental através da melhoria do processo de lavra de quartzito micáceo no município de São Tomé das Letras - Minas Gerais. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas) Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG.

GONÇALVES, J. P., Moura, W. A., Dal Molin, D. C. C. (2002) Avaliação da influência da utilização do resíduo de corte de granito (RCG), como adição, em propriedades mecânicas do concreto. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 53-68, jan. / mar. 2002.

GUIMARÃES, M. S., Valdes, J. R., Palomino, A. M., Santamaria, J. C. (2007) Aggregate production: Fines generation during rock crushing. International Journal of Mineral Processing. n. 81. p. 237-247.

HASPARYC, N. P. (2005) Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado. Tese de Doutorado (Escola de Engenharia – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 326p.

- HOBBS, D. W. (1988) Alkali-silica reaction in concrete. London. Thomas Telford, 183 p. apud HASPARYC, N. P. (2005) Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado. Tese de Doutorado (Escola de Engenharia – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 326p.
- IBRAM (1992) Mineração e Meio Ambiente – Comissão Técnica de Meio Ambiente, Grupo de Trabalho de Redação. Brasília/DF. 126p.
- IGM (Instituto Geológico e Mineiro) Quarry exploitation of ornamental stones – The Portuguese experience. Extraído de http://www.osnet.ntua.gr/Sectors/01_Quarrying/Publications.htm em 02/07/2011
- KIHARA, Y. (1986) Reação álcali-agregado – aspectos mineralógicos. Simpósio nacional de agregados – 1986, São Paulo. Escola Politécnica da USP p. 127-138. apud HASPARYC, N. P. (2005) Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado. Tese de Doutorado (Escola de Engenharia – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 326p.
- LIMA, R. M. F., Silva, A. F. S., Jordt-Evangelista H. (2005) Uso de resíduos de pedreira de quartzito como areia para construção civil e fundição. XXI ENTMME – Encontro Nacional de Tratamento de Minério e Metalurgia Extrativa, Natal – RN.
- LIMA, R. M. F., Silva, A. F. S., Morais, R. M. M., Luz, J. A. M. (2007) Caracterização Tecnológica de resíduos de pedreiras de quartzito na região de Ouro Preto / MG. REM – Revista Escola de Minas, v. 60 (4), p. 663-668.
- MANSUR, A. A. P., Peres, A. E. C., Palhares, L., Mansur, H. S. (2006) Study of pore size distribution of slate ceramic pieces produced by slip casting of waste powders. Minerals Engineering, v. 19, p. 525-527.

- MARTINS NETO, A. A., Djanikian, J. G. (1999) Aspectos de desempenho da argamassa dosada em central. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, SP.
- MECHI, A., Sanches, D. L. (2010) Impactos ambientais da mineração no estado de São Paulo. Estudos Avançados, v. 24, p. 209 – 220.
- MEDEIROS, J. S. (1993) Alvenaria estrutural não armada de blocos de concreto: produção de componentes e parâmetros de projeto. Dissertação de Mestrado (Escola Politécnica). Universidade de São Paulo. São Paulo. Apud SOUSA, J. G. G. (2001) Contribuição ao estudo da relação entre propriedades e proporcionamento de blocos de concreto – aplicação ao uso de entulho como agregado reciclado. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil (Faculdade de Tecnologia). Universidade de Brasília. Brasília, DF.
- MENDES, J. C., Jordt-Evangelista, H. (1998) Rochas ornamentais do estado de Minas Gerais, Brasil. Anais do 10º Congresso Latino americano de Geologia, 1998, Buenos Aires.
- MENEGAKI, M. E., Kaliampakos, D. C. (2010) European aggregates production: Drives, correlations and trends. Resources Policy, v. 35, p. 235-244.
- MENEZES, R. R., Ferreira, H. S., Neves, G. A., Lira, H. L., Ferreira, H. C. (2005) Use of granite sawing wastes in the production of ceramic bricks and tiles. Journal of the European Ceramic Society, v. 25, p. 1149-1158.
- MENEZES, R. R., Brasileiro, M. I., Santana, L. N. L., Neves, G. A., Lira, H. L., Ferreira, H. C. (2008) (a) Utilization of kaolin processing waste for the production of porous ceramic bodies. Waste Management & Research, v. 26, p. 362-368.
- METSO (2005) Manual de britagem. Publicação técnica da Metso Minerais. 6º Edição, Ano 2005.

- MONTEIRO, P. J. M., Wang, K., Sposito, G., dos Santos, M. C., de Andrade, W. P. (1997) Influence of mineral admixtures on the alkali-aggregate reaction. *Cement and Concret Research*, v. 27, n. 12, p. 1899-1909.
- MOURA, W. A., Gonçalves, J. P., Leite, R. S. (2002) Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassas de revestimento e confecção de lajotas para piso. *Sitientibus*, Feira de Santana, n. 26, p. 49-61, jan. / jun. 2002.
- PERES, A. E. C., Chaves, A. P., Lins, F. A. F, Torem, M. L. (2002) Beneficiamento de minérios de ouro. Em: Trindade R. B. E., Barbosa Filho, O. *Extração de ouro: princípios, tecnologia e meio ambiente*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. 344p.
- PEREIRA, C. A., Liccardo, A., da Silva, F. G. (2007) *A arte da cantaria*. Editora C/Arte. Belo Horizonte. 120p.
- PINHEIRO, W. M. G. (2003) Utilização do resíduo da extração da pedra mineira como agregado no concreto. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil (Faculdade de Engenharia Civil) Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP. 202p.
- PIRES, P. R, (2007) Caracterização sócio-econômica e ambiental da atividade do tratamento de quartzito na região de Ouro Preto. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental (Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG. 147p.
- PORMIN - Portal de apoio ao pequeno produtor mineral. Beneficiamento de Minérios. Extraído de <http://www.pormin.gov.br> acessado em 20/04/2011.
- QUARESMA, L. F. (2009) Agregados para a construção civil (produto 22). Perfil de areia para construção civil (relatório técnico 31). J. Mendo Consultoria. Ministério de Minas e Energia – MME. Secretaria de geologia, mineração e transformação mineral – SGM.
- QUARRY PRODUCTS ASSOCIATION (2005) *A guide on aggregates*. Extraído de www.planning4minerals.org.uk em 22/07/2011.

- RAMIRIO R. F.; Pamplona D. R. P.; Franklin Junior I.; Collares E. G. (2008) Estudo comparativo de rejeitos de quartzito com outros agregados comercialmente utilizados como materiais de construção no sudoeste de Minas Gerais. *Ciência et Praxis* v. 1, n. 1.
- RODRIGUES E. (2004) Agregados. SBEA – Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola. Extraído de <http://www.ufrrj.br/institutos/it/dau/profs/edmundoo/Agregados.pdf> acessado em 12/07/2010.
- SABOYA Jr., F., Xavier, G. C., Alexandre, J. (2007) The use of the powder marble by-product to enhance the properties of brick ceramic. *Construction and Building Materials*, v. 21, p. 1950-1960.
- SAMPAIO, J. A., Barbato, C. N. (2007) Ensaio de moagem em laboratório. CETEM - Comunicação técnica elaborada para o livro: Tratamento de Minérios - Práticas Laboratoriais, Parte III – Moagem, Capítulo 9 – pág. 169. Rio de Janeiro, RJ.
- SANDVIK (www.sandvik.com acessado em 17-08-2011)
- SEGADÃES, A. M., Carvalho, M. A., Acchar, W. (2005) Using marble and granite rejects to enhance the processing of clay products. *Applied Clay Science*, v. 30, p. 42-50.
- SILVA, J. B., HOTZA, D., SEGADÃES, A. M., ACCHAR, W. (2005) Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas. *Cerâmica*, v. 51, p. 325-330.
- SILVA, M. E. M. C., Peres, A. E. C. (2006) Thermal expansion of slates wastes. *Minerals Engineering*, v. 19, p. 518-520.
- SILVA, N. G., Buest, G., Campiteli, V. C., (2005) Argamassas com areia britada: Influência dos finos e da fórmula das partículas. VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, I International Symposium on Mortars Technology, Florianópolis, 23 a 25 de maio de 2005.

- SILVA, P. A. D. (2000) Estudos geotécnicos na recuperação ambiental da pedreira municipal de Pirenópolis. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. (Departamento de Engenharia Civil e Ambiental). Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. Brasília, DF.
- SOUSA, J. G. G. (2001) Contribuição ao estudo da relação entre propriedades e proporcionamento de blocos de concreto – aplicação ao uso de entulho como agregado reciclado. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil (Departamento de Engenharia Civil e Ambiental). Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. Brasília, DF.
- SOUZA, L. P. F., Mansur, H. S. (2004) Production and characterization of ceramic pieces obtained by slip casting using powder wastes. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 145, p. 14-20.
- TAMOYO PRÉ-MOLDADOS, <http://www.premoldadostamoyo.com.br> (acessado em 16/06/2011)
- TORRES, P., Fernandes, H. R., Agathopoulos, S., Tulyaganov, D. U., Ferreira, J. M. F. (2004) Incorporation of granite cutting sludge in industrial porcelain tile formulations. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 24, p. 3177-3185.
- TORRES, P., Manjate, R. S., Quaresma, S., Fernandes, H. R., Ferreira, J. M. F. (2007) Development of ceramic floor tile compositions based on quartzite and granite sludges. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 27, p. 4649-4655.
- TORRES, P., Fernandes, H. R., Olheiro, S., Ferreira, J. M. F. (2009) Incorporation of wastes from granite rock cutting and polishing industries to produce roof tiles. *Journal of European Ceramic Society*, v. 29, p. 23-30.
- VALADÃO, G. E. S., Dutra, J. I. G., Galéry, R., Morais, B. F., Braga, G. P, Oliveira, M. M. (2010) Quartzito no parque nacional da serra da Canastra e seu entorno – Relatório Final. DEMIN (Departamento de Engenharia de Minas), UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais).

- VIEIRA, M. T., Catarino, L., Oliveira, M., Sousa, J., Torralba J. M., Cambronero, L. E. G., Gonzáles-Mesones, F. L., Victoria, A. (1999) Optimization of the sintering process of raw material wastes. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 92-93, p. 97-101.
- VIEIRA, C. M. F., Soarez, T. M., Sánchez, R., Monteiro, S. N. (2004) Incorporation of granite waste in red ceramics. *Materials Science and Engineering*, v. 373, p. 115–121.
- VIEIRA, C. M. F., Monteiro, S. N., Barreto, C. G. W., de Carvalho, E. A., Peiter, C. C. (2008) Substituição de areia de quartzo por finos de gnaiss em massa cerâmica para telhas: Teste industrial. *Cerâmica*, v. 54, p. 480-486.
- XAVIER, G. C., Saboya, F., Maia, P. C. A., Alexandre, J. (2009) Análise de processos de degradação acelerada em laboratório para estudo da durabilidade de peças cerâmicas vermelhas incorporadas com resíduo de granito. *Cerâmica*, v. 55, p. 1-10.