UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE RESÍDUOS DA
MINERAÇÃO DE AGREGADOS DA REGIÃO METROPOLITANA DE
SÃO PAULO (RMSP), VISANDO SEU APROVEITAMENTO
ECONÔMICO**

GLÁUCIA CUCHIERATO

Orientador: Prof.^a Dr.^a Lília Mascarenhas Sant'Agostino

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

COMISSÃO JULGADORA

	Nome	Assinatura
Presidente:	Prof. ^a Dr. ^a Lília Mascarenhas Sant'Agostino
Examinadores:	Dr. Claudio Sbrighi Neto
	Dr. José Francisco M. Motta

SÃO PAULO
2000

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE RESÍDUOS DA
MINERAÇÃO DE AGREGADOS DA REGIÃO
METROPOLITANA DE SÃO PAULO (RMSP), VISANDO SEU
APROVEITAMENTO ECONÔMICO.

Gláucia Cuchierato

Orientadora: Prof^{fa}. Dr^a. Lília Mascarenhas Sant'Agostino

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

DEDALUS - Acervo - IGC

30900006052

SÃO PAULO
2000

Às pessoas que tornaram possível o ultrapassar das dificuldades e o aproveitar das oportunidades.

Assim como os antigos moralistas escreviam máximas, deu-me vontade de escrever o que se poderia chamar de mínimas, ou seja, alguma coisa que, ajustada às limitações do meu engenho, traduzisse um tipo de experiência vivida, que não chega a ser sabedoria mas que, de qualquer modo, é resultado de viver.

Andei reunindo pedacinhos de papel onde estas anotações vadias foram feitas e ofereço-as ao leitor, sem que pretenda convencê-lo do que penso nem convidá-lo a repensar suas idéias. São palavras que, de modo canhestro, aspiram enveredar pelo avesso das coisas, admitindo-se que elas tenham um avesso, nem sempre perceptível mas às vezes curioso ou surpreendente.

Carlos Drummond de Andrade

AGRADECIMENTOS

À Professora Doutora Lília Mascarenhas Sant'Agostino pela orientação, pelas informações, sugestões, conselhos, por me ensinar a trilhar os passos da pesquisa com tanta paciência. Obrigada pela dedicação nestes quase 3 anos.

À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado de São Paulo - Processos 98/00798-0 e 98/02917-7), que possibilitou a realização desta pesquisa, com o financiamento da bolsa de estudos e auxílio à pesquisa.

Ao amigo Chico, ou melhor, Geólogo Dr. José Francisco Marciano Motta, do Agrupamento de Geologia Aplicada aos Recursos Minerais do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, agradeço pelo tema da pesquisa, discussões, dicas, amizade, ensinamentos, estímulo, convívio e por muito mais coisas que nem precisam ser escritas e reconhecidas. Em seu nome agradeço aos demais colegas do IPT, que por medo de esquecer algum prefiro fazer meu reconhecimento em grupo.

Ao estimado Dr. Osmar Masson, assessor jurídico do SINDIPEDRAS (Sindicato da Indústria de Mineração da Pedra Britada do Estado de São Paulo), pelo estímulo irrestrito ao meu trabalho, sempre com palavras e atitudes de incentivo e apoio junto às minerações de brita da RMSP. Sem sua colaboração, esta pesquisa teria percorrido caminhos mais complicados.

Ao amigo Prof. Dr. Mário Sérgio de Melo, da Universidade Estadual de Ponta Grossa, por ter me ensinado tanto em diversas fases da minha vida acadêmica e pessoal, pelo incentivo e pelas sugestões no capítulo de geologia e geomorfologia da RMSP.

Ao amigo João Paulo Roncolato Olivito (bolsista PIBIC-CNPq), agradeço pela força nos trabalhos de campo, na preparação de amostras em laboratório e execução de ensaios, e na elaboração do mapa geológico e mapas temáticos. Espero que todo seu esforço seja recompensado de muitas maneiras.

Ao Prof. Dr. Lindolfo Soares (Departamento de Engenharia de Minas - EPUSP), pelas discussões, sugestões e elucidações em várias fases do trabalho.

Aos Geólogos Fernando Valverde (ANEPAC), Hércio Akimoto (ANEPAC/SINDAREIA), João Manoel S. Braga e Eduardo Machado (Mineração Viterbo Machado Luz), pelas informações disponibilizadas sobre a produção de agregados.

À ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), pela execução dos ensaios de concreto para pavimentação, nas pessoas: Eng. Márcio Rocha Pitta, Geól. Yushiro Kihara, Geól. Arnaldo Forti Battagin, Eng. Cláudio Silva, Eng. Rubens Curti e Eng^a. Vanini dos Anjos G. Perez.

Ao Prof. Dr. Samuel M. Toffoli, pela execução dos ensaios de cerâmica, realizados no Laboratório de Matérias-Primas Particuladas e Sólidos Não-Metálicos do Departamento de Química da Escola Politécnica da USP

Ao Químico Marcos H. Gibin, da Vidraria Santa Marina, pela execução dos ensaios de vidro, realizados no Centro de Técnico de Elaboração do Vidro (CETEV).

Ao amigo Luciano de Andrade Gobbo, pela amizade e colaboração em todo o decorrer do mestrado. E também pela simpatia, solicitude, revisões, abstract, etc....

À Marcia Mika Saito, pós-graduanda do IGc-USP, por várias dicas, sugestões, papos, e demais colaborações, principalmente nas revisões finais.

Ao Thiago Bastos Bonás (bolsista FAPESP), pelas descrições petrográficas macro e microscópicas, ensaios granulométricos, e demais atividades do projeto.

Ao Técnico Sílvio Luis, pelo auxílio na preparação de amostras no laboratório do GSA (IGc-USP) e demais atividades desempenhadas durante a pesquisa. Agradeço também ao Serginho e Sr. Valter (CEPAS), pela simpatia e pelos galhos quebrados.

Ao colega Geól. Alexandre Carnier Nunes da Silva e ao Prof. Dr. Arlei Benedito de Macedo, pela cessão da base geológica, pertencentes ao Projeto Alto Tietê. Ao Alexandre, um agradecimento especial pela atenção e paciência nas dicas dadas ao João e no preparo das bases. Agradeço também ao Laboratório de Informática Geológica pela plotagem dos mapas finais.

Ao Geól. Edson Del Monte (IPT), à Geól^a. Sônia Nogueira (IG-SMA) e ao Prof. Dr. Caetano Juliani, pelo empréstimo de bibliografia fundamental para a pesquisa.

À técnica Andreza, pelo auxílio na captação de imagens, no Laboratório de Petrografia Sedimentar do Departamento de Geologia Sedimentar do IGc-USP.

Aos amigos Nicolás, Sérgio (Sehseh), Fabrício e Daniel, que me auxiliaram nos trabalhos pesados de coleta de amostras e visitas a campo.

Aos amigos da Minaplan (Alexandre, Fernando, Daniel, Ana, Eltiza, Alício, Bete e Jean), da Datamine (Tomi, Jon, John, Murray, Derk, Alastair e Susie) e da AKW (Marco, Mr. Donhauser e Frank), obrigado pela oportunidade de crescer com vocês.

À Telma Christina Olszanski Barreto, pelas revisões gramaticais e ortográficas do texto. Se caso passou algum erro (que deve ser inevitável), foi estrita falha minha.

À Ana Paula e Magali, da seção de pós-graduação do IGc-USP, pela atenção e auxílios prestados. Ao pessoal da Gráfica do IgC-USP (Henrique, Edimir, Claudionor, Sr. Dalton), pela atenção na finalização dos volumes da dissertação.

Ao querido Marcelo Barreto, companheiro de todas as etapas de trabalho, colaborador intensivo durante o aperto dos trabalhos finais de campo e laboratório, edição

da dissertação, abstract e várias outras atividades. Muito obrigada pela companhia, pelo carinho, pela amizade, que foram peças fundamentais para o término desta pesquisa.

Ao meu irmão Guilherme Cuchierato (Gui) e ao meu Pap's, Newton João Cuchierato, pelo apoio indireto, mas sem o qual não haveria estrutura para a minha dedicação exclusiva ao mestrado. Obrigado e desculpa !

À minha querida Mãe e a alguns amigos protetores, que não estão aqui fisicamente presentes, mas que me ajudaram muito e estiveram sempre comigo.

Aos amigos, que sem eles não ficaria fácil a tarefa de viver: Fê (Cris), Bu (Marta), Gabi, Fabiana, Mari, Tati, Telma, André Frazão, Carlos, Denise, Helena, Eunuko (Ivan), Sivuka (Carlos), Magry (Alê), Manah (Jeane), Meio-Belo (Marcelo), Jô, Lícia, e muitos outros. Um grande abraço.

Ao Fuckj, meu adorado fusca verde, que apesar dos apuros e quebras, me levou a muitos dos locais onde precisei ir.

Às empresas de mineração que proporcionaram os estudos de caso e aos técnicos e engenheiros responsáveis pelas informações e coletas de amostras:

Viterbo Machado Luz Mineração Ltda
Itaquareia Ind. Extr. de Minérios Ltda
Embu S.A. - Juruaçu
Mineração Sargon Ltda.
Minerpav Mineração Ltda.
Brita Brás Mineração Ltda
Reago Ind. e Comércio Ltda.

Eduardo Machado, João Manoel Braga, Willian Whitaker
Marcos Zabini
Iuri Bueno e Leovaldo Foganhole
Antero Saraiva Jr e Eng. Benito Bottino
Luis Cavaçana e Sr. Cláudio Rosa
Carlos Rolim, João Maffra e Marcos Eduardo
Orize Suzuki e Wilson Iramina

Às demais empresas de mineração visitadas e aos responsáveis pelas informações:

Serveng-Civilsan S.A.
Territorial São Paulo Ltda.
Mineradora Pedrix Ltda.
Panorama Industrial de Granitos S.A.
Pedreira Anhanguera S.A.
Íudice Mineração Ltda.
Itapiserra Mineração Ltda.
Porto de Areia Sete Praias Ltda.
Embu S.A. - Embu
Embu S.A. - Itapeti
Pedreiras Cantareira Ltda.
Pedreira Santa Isabel Ltda.
Pedreira Dutra Ltda.
Pedreira Cachoeira S.A.
Sarp Mineração Ltda.
Empresa de Mineração Floresta Negra Ltda.
Itapisserra Mineração Ltda

Romualdo F. da Silva
Roberto Freitas
Edevaldo e Ana
Osvaldo e Fernando Mendes
Antonio Gomes
José Antônio S. Tortorelli
Osni de Melo
Manoel A. Tremura e José Rubens P. Gomes
Márcio C. Bacchi
Fábio Cavalcanti da Silva
Rosângela Lima e Osvaldo Tsuchiya
Wilson de Souza Leite
Edno Pereira Carlos
Mário Ariño e José Rubens P. Gomes
Sr. Tibaldi
Sr. Udo
José Umberto Imperatore

SUMÁRIO

ÍNDICE.....	<i>ii</i>
ÍNDICE DE TABELAS.....	<i>iv</i>
ÍNDICE DE FIGURAS.....	<i>v</i>
ÍNDICE DE FOTOS.....	<i>vi</i>
RESUMO.....	<i>xi</i>
ABSTRACT.....	<i>xiii</i>
1. INTRODUÇÃO.....	<i>01</i>
2. CONTEXTO REGIONAL.....	<i>08</i>
3. MINERAÇÃO DE AGREGADOS NA RMSP.....	<i>23</i>
4. RESÍDUOS DA MINERAÇÃO DE AGREGADOS.....	<i>57</i>
5. METODOLOGIA.....	<i>71</i>
6. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	<i>101</i>
7. APLICAÇÃO DOS RESÍDUOS.....	<i>149</i>
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	<i>186</i>
9. CONCLUSÕES.....	<i>192</i>
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	<i>195</i>

ÍNDICE

	PÁGINA
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS	3
1.2. JUSTIFICATIVAS	4
1.3. DIAGNÓSTICO DA RMSP	5
2. CONTEXTO REGIONAL	8
2.1. GEOLOGIA	8
2.1.1. Embasamento cristalino	8
2.1.2. Bacia de São Paulo	10
2.1.2.1. Formação Resende	12
2.1.2.2. Formação Tremembé	13
2.1.2.3. Formação São Paulo	13
2.1.2.4. Formação Itaquaquecetuba	14
2.1.3. Unidades Quaternárias	14
2.1.4. Mapa Geológico	15
2.1.5. Unidades litológicas exploradas	18
2.2. GEOMORFOLOGIA	19
3. MINERAÇÃO DE AGREGADOS NA RMSP	23
3.1. DEFINIÇÕES	24
3.2. BENS MINERAIS PRODUZIDOS	27
3.2.1. Brita	28
3.2.2. Areia	28
3.3. DADOS DE RESERVA, PRODUÇÃO E CONSUMO	30
3.3.1. Reserva	31
3.3.2. Produção	34
3.3.3. Consumo	35
3.4. MÉTODOS DE LAVRA E BENEFICIAMENTO	37
3.4.1. Brita	37
3.4.2. Areia	45
3.4.2.1. Métodos de lavra de areia	47
3.4.2.2. Beneficiamento da areia	49
4. RESÍDUOS DA MINERAÇÃO DE AGREGADOS	57
4.1. MINERAÇÕES DE BRITA	57
4.1.1. Pó de pedra	57
4.1.2. Areia de brita	59
4.1.3. Finos de pedreira	61
4.2. MINERAÇÕES DE AREIA	62
4.3. UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS	64
4.3.1. Estudos anteriores	65
4.3.1.1. Indústria cerâmica e vidreira	65
4.3.1.2. Indústria da construção civil e pavimentação	67
5. METODOLOGIA	71
5.1. ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA E COMPILAÇÃO DAS INFORMAÇÕES	72
5.2. LEVANTAMENTO DAS MINERAÇÕES ATIVAS NA RMSP	73
5.2.1. Seleção das minerações para estudo de caso	74
5.3. TRABALHOS DE CAMPO	75
5.4. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	76
5.4.1. Amostragem	77
5.4.2. Preparação de amostras	82

5.4.3. Análise textural	84
5.4.4. Microscopia óptica	84
5.4.5. Classificação Granulométrica	85
5.4.6. Análise visual	87
5.4.7. Análises instrumentais	87
5.4.7.1. Análises químicas	87
5.4.7.2. Análises mineralógicas	88
5.4.8. Ensaio tecnológicos específicos	89
5.4.8.1. Ensaio cerâmicos	89
5.4.8.2. Ensaio para vidro	91
5.4.8.3. Ensaio para pavimento de concreto	94
5.5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	99
6. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	101
6.1. MINERAÇÕES ATIVAS NA RMSP	101
6.1.1. Minerações de Brita	104
6.1.2. Minerações de Areia	107
6.1.3. Áreas potenciais para produção de agregados	109
6.1.4. Minerações visitadas e amostradas	112
6.1.5. Minerações selecionadas para estudo de caso	114
6.2. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS RESÍDUOS DE BRITA	116
6.2.1. Minerações de brita	116
6.2.1.1. Análise textural e Microscopia óptica	116
6.2.1.2. Classificação Granulométrica	122
6.2.1.3. Análise visual	126
6.2.1.4. Análises químicas	133
6.2.1.5. Análises mineralógicas	138
6.2.2. Minerações de areia	141
6.2.2.1. Classificação Granulométrica	142
6.2.2.2. Análises químicas	144
6.2.2.3. Análises mineralógicas	147
7. APLICAÇÃO DOS RESÍDUOS	149
7.1 INDÚSTRIA CERÂMICA	149
7.1.1. Materiais utilizados	153
7.1.2. Resultados Obtidos	156
7.2 INDÚSTRIA VIDREIRA	163
7.2.1. Especificações	164
7.2.1. Materiais utilizados e resultados obtidos	165
7.3 INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL E PAVIMENTAÇÃO	170
7.3.1. Pavimentos de concreto	173
7.3.2. Pavimentos de concreto simples (CS)	174
7.3.2.1. Materiais utilizados para elaboração de CS	176
7.3.2.2. Resultados obtidos	178
7.3.3. Pavimentos de concreto compactado a rolo (CCR)	182
7.3.3.1. Materiais utilizados para elaboração de CCR e resultados obtidos	183
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	186
8.1. Minerações de Brita	187
8.2. Minerações de Areia	189
8.3. Ensaio de aplicação	190
9. CONCLUSÕES	192
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	195

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1.1 – Consumo <i>per capita</i> de agregados no mundo	2
TABELA 1.2 – Municípios da RMSP	5
TABELA 3.1 – Terminologia segundo ABNT	25
TABELA 3.2 – Dados de Reserva de Brita	31
TABELA 3.3 – Dados de Reserva de Areia	33
TABELA 3.4 – Volumes de Produção de Brita	34
TABELA 3.5 – Volumes de Produção de Areia	34
TABELA 3.5 – Métodos de lavra de areia e tipos de depósitos minerais	46
TABELA 5.1 – Atividades desenvolvidas e equipe de trabalho	71
TABELA 5.2 – Critérios de seleção de minerações para estudo de caso	74
TABELA 5.3 – Peneiras utilizadas no ensaio de caracterização granulométrica	86
TABELA 6.1 – Produtos típicos das pedreiras da RMSP	106
TABELA 6.2 – Produtos típicos das minerações de areia da RMSP	108
TABELA 6.3 – Relação das pedreiras visitadas	112
TABELA 6.4 – Relação das minerações de areia visitadas	112
TABELA 6.5 – Amostragem efetuada	113
TABELA 6.6 – Pedreiras selecionadas para estudo de caso	114
TABELA 6.7 – Minerações de areia selecionadas para estudo de caso	114
TABELA 6.8 – Ensaio realizados	116
TABELA 6.9 – Resultados da Análise Textural e Mineralogia Óptica - Granitos	117
TABELA 6.10 – Resultados da Análise Textural e Mineralogia Óptica - Gnaisses	120
TABELA 6.12 – Resultados dos ensaios granulométricos do pó de pedra	123
TABELA 6.13 – Variação da granulometria, segundo tipo de amostragem	125
TABELA 6.14 – Composição química dos resíduos de mineração de brita	133
TABELA 6.15 – Variação da composição química, segundo amostragem	135
TABELA 6.16 – Composição química nas frações granulométricas de interesse	135
TABELA 6.17 – Composição mineralógica dos resíduos de mineração de brita	138
TABELA 6.18 – Resultados dos ensaios granulométricos dos finos de areia	142
TABELA 6.19 – Variação da granulometria, segundo tipo de amostragem	143
TABELA 6.20 – Composição química dos resíduos de mineração de areia	144
TABELA 6.21 – Variação da composição química, segundo amostragem	146
TABELA 6.22 – Composição química, por fração granulométrica de interesse	146
TABELA 6.23 – Composição mineralógica dos resíduos de mineração de areia	147
TABELA 7.1 – Classificação dos produtos cerâmicos	150
TABELA 7.2 – Etapas do processo de fabricação dos produtos cerâmicos	151
TABELA 7.3 – Participação da fração -0,074 mm na produção total de resíduos	154
TABELA 7.4 – Composição química da fração -0,074mm	155
TABELA 7.5 – Composição mineralógica da fração -0,074mm	155
TABELA 7.6 – Comportamento cerâmico qualitativo dos resíduos de mineração de brita	156
TABELA 7.7 – Comportamento cerâmico dos resíduos de mineração de areia	160
TABELA 7.8 – Tipologia das placas cerâmicas	160
TABELA 7.9 – Parâmetros determinativos do uso em tijolos e telhas	161
TABELA 7.10 – Composição de alguns vidros	165
TABELA 7.11 – Composição química da fração -0,59 +0,074 mm	166
TABELA 7.12 – Participação da fração -0,59 +0,074 mm na produção total de resíduos	166
TABELA 7.13 – Formulação das matérias-primas nas composição dos vidros	167
TABELA 7.14 – Composição dos vidros ensaiados	167

TABELA 7.15 – Principais vantagens do pavimento de concreto	172
TABELA 7.16 – Limites granulométricos do agregado miúdo para concretos de pavimentação	175
TABELA 7.17 – Composição granulométrica dos resíduos	176
TABELA 7.18 – Composição granulométrica dos resíduos (ABCP)	178
TABELA 7.19 – Dosagens do concreto simples (Curva de Abrams) - BR17	180
TABELA 7.20 – Dosagens do concreto simples (CS)	181
TABELA 7.21 – Propriedades típicas do CCR	183
TABELA 7.22 – Distribuição dos agregados no CCR	183
TABELA 7.23 – Dosagens do concreto compactado com rolo (CCR) - BR12	184
TABELA 7.24 – Dosagens de CCR em casos da bibliografia	185

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – Mapa de Localização da RMSP	7
FIGURA 2.1 – Quadro litoestratigráfico do <i>Rift</i> Continental do Sudeste do Brasil	11
FIGURA 2.2 – Mapa Geológico da RMSP	17
FIGURA 3.1 – Minerações em atividade no período 1997-1999	23
FIGURA 3.2 – Reservas minerais medidas de brita	31
FIGURA 3.3 – Reservas minerais medidas de brita por municípios	32
FIGURA 3.4 – Produção de brita no Brasil	34
FIGURA 3.5 – Produção de brita no Brasil	35
FIGURA 3.6 – Panorama das minerações de areia	46
FIGURA 5.1 – Fluxograma para preparação de amostras de resíduos de mineração de brita (beneficiamento a seco)	82
FIGURA 5.2 – Fluxograma para preparação de amostras de resíduos de mineração de areia e de brita (beneficiamento a úmido)	82
FIGURA 5.3 – Fluxograma adotado para quarteamento	83
FIGURA 6.1 – Mapa de localização das pedreiras na RMSP	102
FIGURA 6.2 – Mapa de localização das empresas produtoras de areia na RMSP	103
FIGURA 6.3 – Produção e capacidade instalada das pedreiras da RMSP visitadas no projeto	104
FIGURA 6.4 – Tipos de beneficiamento das pedreiras da RMSP visitadas pelo projeto	106
FIGURA 6.5 – Universo de empresas produtoras de areia na RMSP	108
FIGURA 6.6 – Mapa de áreas potenciais de produção de brita na RMSP	110
FIGURA 6.7 – Mapa de áreas potenciais de produção de areia na RMSP	111
FIGURA 6.8 – Diagrama triangular para rochas-fonte das pedreiras	121
FIGURA 6.9 – Diagrama triangular para rochas-fonte das pedreiras	122
FIGURA 6.10 – Curvas granulométricas do pó de pedra	123
FIGURA 6.11 – Relação % do material passante na fração 0,074 mm e Índice de máficos	124
FIGURA 6.12 – Variação da granulometria, segundo tipo de amostragem	125
FIGURA 6.13 – Relação entre os teores de $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ e os teores de SiO_2	133
FIGURA 6.14 – Relação entre os teores de Fe_2O_3 e o Índice de máficos	134
FIGURA 6.15 – Relação entre os teores de SiO_2 e as frações granulométricas de interesse	136
FIGURA 6.16 – Relação entre os teores de Fe_2O_3 e as frações granulométricas de interesse	137
FIGURA 6.17 – Relação entre os teores de TiO_2 e as frações granulométricas de interesse	137
FIGURA 6.18 – Relação entre os teores de MgO e as frações granulométricas de interesse	137
FIGURA 6.19 – Difrátograma 3D nas frações de interesse à aplicação industrial - BR12	139
FIGURA 6.20 – Difrátograma 3D nas frações de interesse à aplicação industrial - BR16	139
FIGURA 6.21 – Difrátograma 3D nas frações de interesse à aplicação industrial - BR17	140

FIGURA 6.22 – Difrátograma 3D nas frações de interesse à aplicação industrial - BR29	140
FIGURA 6.23 – Difrátograma 3D nas frações de interesse à aplicação industrial - BR31	140
FIGURA 6.24 – Curvas granulométricas dos finos de areia	142
FIGURA 6.25 – Variação da granulometria, segundo tipo de amostragem	143
FIGURA 6.26 – Relação entre os teores de $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ e os teores de SiO_2	145
FIGURA 6.27 – Relação entre os teores de Al_2O_3 e os teores de SiO_2	145
FIGURA 6.28 – Difrátograma 3D das areias estudadas	147
FIGURA 6.29 – Difrátograma 3D nas frações de interesse à aplicação industrial - AR42c	148
FIGURA 7.1 – Resistência mecânica a flexão	162
FIGURA 7.2 – Massa específica aparente	162
FIGURA 7.3 – Porosidade aparente	162
FIGURA 7.4 – Absorção d'água	162
FIGURA 7.5 – Distribuição das matérias-primas na composição dos vidros	167
FIGURA 7.6 – Situação da pavimentação na malha viária no Brasil	173
FIGURA 7.7 – Limites das Zonas 3 e 4 e curvas granulométricas dos resíduos	177
FIGURA 7.8 – Diferença do comportamento granulométrico dos resíduos	179
FIGURA 7.9 – Curva de Abrams, para três pontos água/cimento (BR17)	180
FIGURA 7.10 – Resistências à compressão dos traços elaborados	181
FIGURA 7.11 – Limites da composição do agregado recomendado para o CCR	184

ÍNDICE DE FOTOS

FOTOS 2.1 e 2.2 – Aspectos de atividade da mineração, com a cidade ao fundo (Serra da Cantareira - região norte do município de São Paulo).	22
FOTOS 2.3 e 2.4 – Observação da modificação do relevo com a expansão urbana (Perus - região norte do município de São Paulo)	22
FOTO 3.1 – Pilha de Estocagem do Pó de Pedra (BR29)	26
FOTO 3.2 – Pilha de Estocagem do Pó de pedra (BR10)	26
FOTO 3.3 – Circuito de classificação da areia de brita (BR09)	26
FOTO 3.4 – Bacia de decantação dos finos de pedreira (BR09)	26
FOTO 3.5 – Vista da frente de lavra e bancadas (BR26)	37
FOTO 3.6 – Vista da frente de lavra e bancadas (BR34)	37
FOTO 3.7 – Vista da frente de lavra e bancadas (BR20)	37
FOTO 3.8 – Perfuratrizes fazendo a malha de fogo (BR21)	38
FOTO 3.9 – Desmonte da bancada (no momento da explosão) – (BR06)	38
FOTO 3.10 – Desmonte da bancada (após a explosão) - (BR06)	38
FOTO 3.11 – Material resultante de desmonte primário (BR12)	38
FOTO 3.12 – Desmonte secundário por rompedores hidráulico (BR21)	38
FOTO 3.13 – Carregamento dos caminhões (BR21)	39
FOTO 3.14 – Formação da praça de alimentação (BR31)	39
FOTO 3.15 – Alimentação do britador por caminhões (BR20)	39
FOTO 3.16 – Britador primário (BR21)	40
FOTO 3.17 – Britador primário (BR06)	40
FOTO 3.18 – Britador primário (BR20)	40
FOTO 3.19 – Pilha de bica corrida (BR08)	40
FOTO 3.20 – Pilha pulmão (BR29)	41
FOTO 3.21 – Pilha pulmão (BR12)	41
FOTO 3.22 – Britador secundário (BR01)	41
FOTO 3.23 – Britador secundário (BR29)	41

FOTO 3.24 – Britador secundário (BR06)	41
FOTO 3.25 – Britador quaternário (BR01)	42
FOTO 3.26 – Britadores terciário e quaternário (BR17)	42
FOTO 3.27 – Britadores terciário e quaternários (BR09)	42
FOTO 3.28 – Correias transportadoras (BR06)	43
FOTO 3.29 – Cachoeira de pedra (BR34)	43
FOTO 3.30 – Aspersores no britador primário (BR20)	43
FOTO 3.31 – Aspersores em correias transportadoras (BR28)	43
FOTO 3.32 – Peneiras vibratórias (BR20)	43
FOTO 3.33 – <i>Deck</i> de peneiras (BR30)	43
FOTO 3.34 – <i>Deck</i> de peneiras (BR31)	44
FOTO 3.35 – Silos de peneiras (BR20)	44
FOTO 3.36 – Pilha de Pedra 1, Pedra 3 e Pedrisco (BR30)	44
FOTO 3.37 – Pilha de pedrisco (BR09)	44
FOTO 3.38 – Separação dos produtos em pilhas (BR34)	44
FOTO 3.39 – Pilha de Pedra 01 (BR31)	44
FOTO 3.40 – Expedição dos produtos (BR09)	45
FOTO 3.41 – Expedição automatizada de Pedra 01 (BR29)	45
FOTO 3.42 – Vista da frente de lavra (AR16)	47
FOTO 3.43 – Desmonte hidráulico (AR42)	47
FOTO 3.44 – Desmonte hidráulico (AR14)	47
FOTO 3.45 – Vista da frente de lavra (AR32)	47
FOTO 3.46 – Desmonte por escarificação (AR 14)	47
FOTO 3.47 – Desmonte por escarificação (AR 32)	47
FOTO 3.48 – Escoamento da polpa para a bacia de dragagem (AR14)	47
FOTO 3.49 – Bacia de dragagem (AR39)	47
FOTO 3.50 – Caixa de relavagem (AR42)	50
FOTO 3.51 – Lavagem e escoamento (AR06)	50
FOTO 3.52 – Peneira estática para corte do cascalho (AR42)	50
FOTO 3.53 – Peneira estática para corte do cascalho (AR01)	50
FOTO 3.54 – Silos de classificação (AR42)	51
FOTO 3.55 – Silos de classificação (AR16)	51
FOTO 3.56 – Silos de classificação (AR32)	51
FOTO 3.57 – Silos de classificação (AR16)	51
FOTO 3.58 – Preenchimento dos silos (AR42)	52
FOTO 3.59 – Preenchimento dos silos (AR39)	52
FOTO 3.60 – Preenchimento dos silos (AR63)	52
FOTO 3.61 – Estravasamento do underflow (AR42)	52
FOTO 3.62 – <i>Overflow</i> indo para a bacia de decantação (AR42)	52
FOTO 3.63 – Hidrocilones (AR14)	53
FOTO 3.64 – Hidrociclones (AR42)	53
FOTO 3.65 – Hidrociclones (AR06)	53
FOTO 3.66 – Carregamento dos caminhões diretamente nos silos (AR39)	53
FOTO 3.67 – Carregamento dos caminhões diretamente nos silos (AR32)	53
FOTO 3.68 – Pilha de areia (AR06)	54
FOTO 3.69 – Pilhas de estoque (AR16)	54
FOTO 3.70 – Pilhas de estoque (AR14)	54
FOTO 3.71 – Carregamento dos caminhões nas pilhas (AR25)	54
FOTO 3.72 – Classificador em espiral (BR09/AR61)	55
FOTO 3.73 – Roda d'água (BR16/AR66)	55
FOTOS 3.74 e 3.75 – Tanque com "raspador" instalado (BR07/AR60)	55
FOTO 3.76 – Hidrociclones (BR09/AR51)	56
FOTO 3.77 – Classificador em espiral (BR31/AR64)	56

FOTO 4.1 – Pilha de estoque de Pó de Pedra (BR01)	58
FOTO 4.2 – Pilha de pó de pedra (BR30)	58
FOTO 4.3 – Pilha de estoque de Pó de Pedra (BR34)	58
FOTO 4.4 – Pilha de pó de pedra (BR29)	58
FOTO 4.5 – Pilha estoque de pó de pedra (BR28)	58
FOTO 4.6 – Areia de brita (BR16)	60
FOTO 4.7 – Areia de brita (BR16)	60
FOTO 4.8 – Areia de brita (BR07)	60
FOTO 4.9 – Bacia de decantação dos finos (BR09)	62
FOTO 4.10 – Bacia de decantação dos finos (BR01)	62
FOTO 4.11 – Bacia de decantação dos finos (BR16)	62
FOTO 4.12 – Bacia de decantação dos resíduos finos (AR16)	63
FOTO 4.13 – Bacia de decantação dos resíduos finos (AR42 Global)	63
FOTO 4.14 – Bacia de decantação dos resíduos finos (AR25)	63
FOTO 4.15 – Bacia de decantação dos resíduos finos (AR08)	63
FOTO 4.16 – Bacia de decantação dos finos (AR42 Cida)	63
FOTO 4.17 – Bacia de decantação dos finos (AR06)	63
FOTO 5.1 – Local da amostragem de pó de pedra (BR30)	79
FOTO 5.2 – Local da amostragem de pó de pedra (BR10)	79
FOTO 5.3 – Local de amostragem do pó de pedra (BR17)	80
FOTO 5.4 – Local da amostragem de pó de pedra (BR08)	80
FOTO 5.5 – Local da amostragem de pó de pedra (BR31)	80
FOTO 5.6 – Local da amostragem de pó de pedra (BR26)	80
FOTO 5.7 – Local da amostragem dos finos (AR25)	80
FOTO 5.8 – Local da amostragem dos finos (AR42c)	80
FOTO 5.9 – Local da amostragem dos finos (AR06)	81
FOTO 5.10 – Local da amostragem dos finos (AR14)	81
FOTO 5.11 – Local da amostragem dos finos (BR16)	81
FOTO 5.12 – Local da amostragem dos finos (AR42g)	81
FOTO 5.13 – Local da amostragem dos finos (AR01)	81
FOTO 5.14 – Local da amostragem dos finos (AR42g)	81
FOTO 5.15 – Prensa utilizada para moldagem dos corpos-de-prova	90
FOTO 5.16 – Moldagem dos corpos-de-prova	90
FOTO 5.17 – Forno utilizado para a queima (< 1.250 °C)	90
FOTO 5.18 – Forno utilizado para a queima (> 1.250 °C)	90
FOTO 5.19 – Composição do vidro com matérias-primas	92
FOTO 5.20 – Pesagem dos materiais	92
FOTO 5.21 – Homogeneização em pó	92
FOTO 5.22 – Adição da mistura no forno (2ª operação)	93
FOTO 5.23 – Injeção de argônio para redução de bolhas	93
FOTO 5.24 – Injeção de argônio para redução de bolhas	93
FOTO 5.25 – Conformação do vidro após fusão	93
FOTO 5.26 – Conformação do vidro após fusão	93
FOTO 5.27 – Vidro conformado	94
FOTO 5.28 – Recozimento em mufla	94
FOTO 5.29 – Betoneira (capacidade mínima = 25 litros)	96
FOTO 5.30 – Mistura do concreto	96
FOTO 5.31 – Cone (cálculo de abatimento)	96
FOTO 5.32 – Cálculo de abatimento do tronco do cone	97
FOTO 5.33 – Formas de corpos-de-prova cilíndricos	97
FOTO 5.34 – Formas de corpos-de-prova prismáticas	97

FOTO 5.35 – Mesa vibratória	97
FOTO 5.36 – Câmara úmida	98
FOTO 5.37 – Câmara úmida	98
FOTO 5.38 – Corpos-de-prova de CS	98
FOTO 5.39 – Corpos-de-prova de CCR	98
FOTO 5.40 – Prensa (ensaio de resist. à compressão)	99
FOTO 5.41 – Prensa (ensaio de resist. à compressão)	99
FOTO 5.42 – Flexômetro (ensaio de resist. à tração)	99
FOTO 5.43 – Flexômetro (ensaio de resist. à tração)	99
FOTO 6.1 – Amostra BR01 (Granito 3b)	118
FOTO 6.2 – Lâmina BR01	118
FOTO 6.3 – Amostra BR07 (Granito 3a)	118
FOTO 6.4 – Amostra BR19 (Granito 3b)	118
FOTO 6.5 – Amostra BR08 (Granito 3b)	118
FOTO 6.6 – Lâmina BR08	118
FOTO 6.7 – Amostra BR21 (Granito 3a)	118
FOTO 6.8 – Amostra BR23 (Granito 3a)	118
FOTO 6.9 – Amostra BR12 (Granito 3b)	118
FOTO 6.10 – Lâmina BR12	118
FOTO 6.11 – Amostra BR16 (Granito 3a)	118
FOTO 6.12 – Lâmina BR16	118
FOTO 6.13 – Amostra BR17 (Granito 3a)	119
FOTO 6.14 – Lâmina BR17	119
FOTO 6.15 – Amostra BR11 (Tonalito)	119
FOTO 6.16 – Lâmina BR11	119
FOTO 6.17 – Amostra BR10 (Granodiorito)	119
FOTO 6.18 – Lâmina BR10	119
FOTO 6.19 – Amostra BR09 (Granodiorito)	119
FOTO 6.20 – Lâmina BR09	119
FOTO 6.21 – Amostra BR31 (Granodiorito)	119
FOTO 6.22 – Lâmina BR31	119
FOTO 6.23 – Amostra BR34 (Granodiorito)	119
FOTO 6.24 – Lâmina BR34	119
FOTO 6.25 – Amostra BR20 (Gnaiss)	120
FOTO 6.26 – Amostra BR26 (Gnaiss)	120
FOTO 6.27 – Amostra BR28 (Gnaiss)	120
FOTO 6.28 – Amostra BR30 (Gnaiss)	120
FOTO 6.29 – Lâmina BR20	120
FOTO 6.30 – Lâmina BR26	120
FOTO 6.31 – Lâmina BR28	120
FOTO 6.32 – Lâmina BR30	120
FOTO 6.33 – Pó de pedra (BR06)	126
FOTO 6.34 – Pó de Pedra (BR08)	126
FOTO 6.35 – Pó de pedra (BR10)	127
FOTO 6.36 – Pó de pedra (BR12)	127
FOTO 6.37 – Pó de pedra (BR17)	127
FOTO 6.38 – Pó de pedra (BR19)	127
FOTO 6.39 – Pó de pedra (BR21)	127
FOTO 6.40 – Pó de pedra (BR26)	127
FOTO 6.41 – Pó de pedra (BR28)	128
FOTO 6.42 – Pó de pedra (BR29)	128
FOTO 6.43 – Pó de pedra (BR30)	128

FOTO 6.44 – Pó de pedra (BR31)	128
FOTO 6.45 – Pó de pedra (BR34)	128
FOTO 6.46 – Fração +2,0 mm (BR12)	129
FOTO 6.47 – Fração +2,0 mm (BR16)	129
FOTO 6.48 – Fração +2,0 mm (BR17)	129
FOTO 6.49 – Fração +2,0 mm (BR29)	129
FOTO 6.50 – Fração +2,0 mm (BR31)	130
FOTO 6.51 – Fração -2,0 mm +0,6 mm (BR12)	130
FOTO 6.52 – Fração -2,0 mm +0,6 mm (BR16)	130
FOTO 6.53 – Fração -2,0 mm +0,6 mm (BR17)	131
FOTO 6.54 – Fração -2,0 mm +0,6 mm (BR29)	131
FOTO 6.55 – Fração -2,0 mm +0,6 mm (BR31)	131
FOTO 6.56 – Fração +0,6 mm -0,074 mm (BR12)	132
FOTO 6.57 – Fração +0,6 mm -0,074 mm (BR16)	132
FOTO 6.58 – Fração +0,6 mm -0,074 mm (BR17)	132
FOTO 6.59 – Fração +0,6 mm -0,074 mm (BR29)	132
FOTO 6.60 – Fração +0,6 mm -0,074 mm (BR31)	132
FOTO 7.1 – Corpos-de-prova do resíduo BR12	157
FOTO 7.2 – Corpos-de-prova do resíduo BR16	157
FOTO 7.3 – Corpos-de-prova do resíduo BR17	157
FOTO 7.4 – Corpos-de-prova do resíduo BR31	157
FOTO 7.5 – Corpos-de-prova do resíduo AR06	159
FOTO 7.6 – Corpos-de-prova do resíduo AR25	159
FOTO 7.7 – Corpos-de-prova do resíduo AR42c	159
FOTO 7.8 – Corpos-de-prova do resíduo AR42g	159
FOTO 7.9 – Vidro feito com a amostra BR12	168
FOTO 7.10 – Vidro feito com a amostra BR31	168
FOTO 7.11 – Vidro feito com a amostra AR42c (caso 1)	168
FOTO 7.12 – Vidro feito com a amostra AR42c (caso 2)	168
FOTO 7.13 – Comparação entre os vidros obtidos	168

RESUMO

Esta pesquisa visa contribuir com alternativas tecnológicas para a utilização dos resíduos de minerações de agregados produzidos na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Como a terceira maior metrópole do mundo, a RMSP abriga cerca de 18 milhões de habitantes, com consumo *per capita* de agregados de 4,2 t/hab/ano. É responsável por 25 % da produção nacional, o que significou mais de 18 milhões de m³ de brita e 20 milhões de m³ de areia para o ano de 1999.

As operações em atividade, durante o período estudado (1998-2000), compreendem 39 minerações de brita e 66 minerações de areia. As litologias-fonte de brita são rochas granitóides maciças, foliadas ou orientadas (maioria com textura porfirítica e matriz média a fina), e rochas gnáissicas (textura predominantemente granolepidoblástica). As rochas-fonte de areia são mantos de intemperismo de rochas graníticas, rochas sedimentares areno-argilosas e sedimentos de planícies aluviais.

Foram visitadas metade das minerações de brita em atividade, subdivididas em três grupos quanto ao processo de beneficiamento e tipo de material fino produzido, que é parte comercializado e parte acumulado em pilhas ou bacias de decantação. O primeiro grupo reúne as minas que operam a seco, com produção de pedrisco e **pó de pedra** (-4,8 mm), o segundo aquelas que operam a úmido, com a produção de **areia de brita** (-4,8 mm +0,074 mm) pela lavagem do pedrisco e descarte dos **finos de pedreira** (-0,074 mm), e o terceiro grupo aquelas que operam a seco mas possuem uma estrutura flexível, e podem produzir areia de brita quando há demanda, ou pedrisco e pó, se este for o produto exigido pelo mercado. Os resíduos variam de 10 a 42 % do total da produção, o que significa mais de 3 milhões de m³ por ano.

A areia é produzida a partir de vários tipos de empreendimentos: cava seca por desmonte hidráulico; cava submersa e extração em leito de rio com método de lavra por dragagem, bem como pedreiras e minerações de caulim ou argila para cerâmica, onde a areia participa como subproduto, tendo sido realizadas visitas em cerca de 20 % das minerações. Os resíduos compreendem 30 a 50 % da produção total, significando anualmente mais de 8 milhões de m³. São compostos, predominantemente, por areia fina, silte e argila, e geralmente depositados em bacias de decantação.

A partir de visitas e amostragens junto à empreendimentos minerários selecionados, os resíduos foram caracterizados tecnologicamente, tendo sido submetidos à preparação de amostras, ensaios de classificação granulométrica (peneiramento e difração laser), análise visual, análises instrumentais (difração de raios-X e fluorescência de raios-X) e ensaios tecnológicos específicos para as indústrias cerâmica, vidreira e de construção civil e pavimentação. Complementarmente, foram realizadas análises petrográficas em rochas-fonte de minerações de brita.

Os resíduos das pedreiras foram caracterizados como de composição sílico-aluminosa e mineralogia básica quartzo-feldspática, e mostraram comportamento granulométrico similar entre eles. Os resíduos de mineração de areia também são sílico-aluminosos e quartzo-feldspáticos, com uma quantidade significativa de argilominerais, tendo variado o comportamento granulométrico de acordo com o tipo de beneficiamento da mineração.

Verificou-se que a melhor utilização para os resíduos de mineração de agregados da RMSP é na indústria de pavimentação, com a aplicação do **pó de pedra e areia de brita** em pavimentos de concreto simples (CS) e compactado a rolo (CCR), como agregado miúdo em bases e sub-bases. Os **finos de pedreira** podem ser utilizados na indústria cerâmica, atuando como fundentes e/ou emagrecedores de matérias-primas excessivamente plásticas. A **areia de brita** e o **pó de pedra** contém uma fração granulométrica que pode ser matéria-prima estratégica para vidros de embalagem coloridos (soda-cal), caso haja interesse em separá-la. Neste caso, sugere-se, também, beneficiamento adicional para redução dos teores de ferro, melhorando a qualidade e aumentando seu valor.

Para os **finos das minerações de areia**, com granulometria menor que 0,074 mm, o melhor uso é em massas cerâmicas dos segmentos estrutural, revestimento e branca, com a adição de alguns componentes para a otimização da massa elaborada com os resíduos. Para o único caso estudado que gera um resíduo contendo areia (-0,42 mm), a fração grossa, que precisa ser eliminada para aproveitamento cerâmico, pode ser aplicada para o mesmo segmento da indústria do vidro supra citada.

ABSTRACT

The purpose of this work is to contribute with technological alternatives for the application of wastes generated from sand and crushed stone mining in The Great São Paulo Metropolitan Area (GSPMA). The GSPMA is classified as the third among the biggest metropolitan area of the world, and hold almost 18 million of inhabitants, with 4.2 t/hab/year of aggregate *per capita* consumption. The 1999's production of aggregates in the GSPMA was over 18 million m³ of crushed stone and 20 million m³ of sand.

The active mining operations during the studied period (1998 - 2000) comprise 39 crushed stone mines and 66 sand mines. The crushed stone is predominantly obtained from granitic rocks (with porphyritic texture and medium to fine groundmass) and gneissic rocks (with granolepidoblastic texture). The natural sand is extracted mostly from weathred granitic and gneissic rocks of basement, sedimentary rocks and alluvial plain sediments.

Half of the crushed stone mines in activity were visited, and they can be divided in three groups, according to the beneficiation processing and type of fine products generated. Some of these materials are commercialized and some of them are accumulated in stockpiles or tailing pond. The first group joint those with dry beneficiation and produce a grade variety of crushed stone and **rock powder** (-4.8mm). The second one has wet beneficiation, with production of **crushed sand** (-4.8 + 0,074 mm) by washing the fraction less than 10 mm, wasting **quarry fines** (-0,074 mm). The third group gets together the mines that have dry beneficiation (producing rock powder), and a flexible circuit to produce also crushed sand, when demanded. The waste can achieve 10 to 42 % of the total production, which means over 3 millions m³ per year.

Sand is produced from many types of mining operation: open pit with hydraulicking extraction, bed river underwater mining by dredging, and quarries, kaolin or ceramic clay mines in which sand is by-product. Almost 20 % of total mines were visited. The wastes from sand mining reach 30 to 50% of the total production, which means over 8 millions m³ per year, and they are mostly composed of fine sand, silt and clay and deposited in tailing pond.

Selected mines were visited and had their wastes sampled. The samples were submitted to technological characterization, including sample preparation, grain size classification (sieving and laser diffraction), visual analysis, instrumental analysis (X-ray diffraction and X-ray fluorescence) and specific application tests for ceramic and glass industry, as well as civil construction and pavement industry.

The wastes from crushed stone mining have silico-aluminous composition and quartz-feldspatic mineralogy, with similar grain size distribution. The wastes from sand mining are also silico-aluminous and quartz-feldspatic, with significant quantity of clay minerals, and their grain size distribution vary according to the type of beneficiation process on the mines.

This study concluded that the best application for the GSPMA aggregate wastes should be in the pavement industry, using the rock powder and crushed sand in bases and sub-bases of concrete pavements. The **quarry fines** can be applied in ceramic industry as fluxing material and/or plasticity reducer raw material. **Crushed sand** and **rock powder** have a grain size fraction (0.59 to 0.075 mm) to be strategically used in coloured vessel glasses, if there were interest to separate it. In this case, some additional beneficiation process could reduce high iron oxide grades, to increase value and improve quality.

For the **sand mining wastes** with grain size distribution below 0,074 mm, the best application verified is for ceramic body of structural, wall and floor tile and witewares segments, with addition of some components, to optimize the body elaborated with the wastes. When the wastes include fine sand fraction (-0,42 mm), the coarse materials that must be eliminated for ceramic use, should be well applied for the same glass industry segment above, as verified in one study case.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

O Estado de São Paulo é responsável pela maior produção de minerais industriais do país, principalmente destinados ao uso na construção civil, tendo sua atividade mineira se dado em apoio ao desenvolvimento urbano e industrial no fornecimento de matérias-primas a partir das ocorrências geológicas locais. É também o mais importante Estado produtor e consumidor de minerais de aplicação imediata na construção civil, material conhecido no setor industrial como **Agregados**. Esta posição se deve à grande concentração demográfica e industrial, que exige materiais para a construção e manutenção de obras de infra-estrutura que atendam às necessidades básicas, tais como: habitação, transporte, água encanada, esgotamento sanitário, dentre tantas outras.

A mineração de agregados para construção civil possui características típicas, destacando-se:

- ✓ *grandes volumes de produção;*
- ✓ *beneficiamento simples;*
- ✓ *baixo preço unitário;*
- ✓ *alto custo relativo de transporte; e*
- ✓ *necessidade de proximidade das fontes produtoras / local de consumo.*

A produção nacional de agregados foi, no ano de 1999, de 344,1 milhões de toneladas, sendo o Estado de São Paulo responsável por 32,3 % deste valor (DNPM 2000). A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) é a principal região produtora e consumidora de areia e brita do Estado e do Brasil.

Segundo a Union Nationale des Producteurs de Granulats (UEPG 2000), os agregados são os materiais de construção mais utilizados no mundo inteiro e em 16 países europeus observa-se que, em média, cada habitante consome aproximadamente 511 toneladas de agregados durante toda sua vida. O Brasil tem um dos menores índices de consumo *per capita* de agregados do mundo, com cerca de 2,1 t/hab/ano (DNPM 2000), enquanto na Europa esta taxa chega a 6-10 t/hab/ano (**TABELA 1.1**). Na Espanha (ANEFA 2000), dados de 1998 indicam a taxa

de 7,1 t/hab/ano, com regiões chegando a 13,9 e 9,7 t/hab/ano (respectivamente Navarra e Cantabria).

Segundo a National Stone Association (NSA 1999), os USA produziram mais de 2 bilhões de toneladas de agregados no último ano, a uma taxa de 8 t/hab/ano, sendo que alguns estados atingem a taxa de até 18 t/hab/ano (LAFARGE 2000), o que representa a metade do valor da produção mineral nacional (excluindo combustíveis). A província de Ontário, no Canadá, com uma população de 9 milhões de habitantes atingia, já na década de 80, o índice de 20,3 t/hab/ano (SCOTT 1989).

TABELA 1.1 - Consumo *per capita* de agregados no mundo

PAÍS	CONSUMO (T/HAB/ANO)	LOCAL	CONSUMO (T/HAB/ANO)
Áustria ⁽¹⁾	11,2	Província de Ontário (Canadá) ⁽³⁾	20,3
Suécia ⁽¹⁾	10,7	USA ⁽⁴⁾	8,0 (18,0)
Finlândia ⁽¹⁾	10,1	Brasil ⁽⁵⁾	2,1
Dinamarca ⁽¹⁾	9,0	Estado de São Paulo ⁽⁵⁾	3,5
Suiça ⁽¹⁾	8,2	RMSP ⁽⁶⁾	4,2
Espanha ⁽²⁾	7,1 (9,7 - 13,9)		
França ⁽¹⁾	6,8		
Alemanha ⁽¹⁾	6,7		
Reino Unido ⁽¹⁾	5,2		
Itália ⁽¹⁾	5,0		
Bélgica ⁽¹⁾	3,9		
Hungria ⁽¹⁾	3,8		

Fonte: (1) LE GRANULAT (1990) - publicação UEPG com índices *per capita* mais recentes
 (2) ANEFA (2000) - entre parêntesis, os valores mínimo e máximo encontrados nacionalmente
 (3) SCOTT (1989) - publicação mais recente encontrada para ilustrar dados canadenses
 (4) NSA (1999) - entre parêntesis, o valor máximo encontrado nacionalmente
 (5) DNPM (2000)
 (6) dados calculados nesta pesquisa, a partir de valores de produção na RMSP e ESP.

Na RMSP, o consumo anual de agregados é da ordem de 4,2 toneladas/habitante, ou seja, o dobro da média nacional, porém ainda muito aquém da média de consumo dos países desenvolvidos, mesmo comparando com as próprias regiões metropolitanas. Vale ressaltar que a necessidade de consumo de agregados na RMSP é de, pelo menos, três vezes o valor atual para atender a demanda das inúmeras obras de habitação e infra-estrutura que a metrópole está a exigir. Acredita-se, porém, que nesta primeira década do novo milênio, estejamos prestes a verificar a retomada da economia no setor de construção civil, e, diretamente, no setor de mineração de agregados.

Inserida neste contexto, esta pesquisa buscou identificar as características da produção de agregados na RMSP, voltando-se para o estudo de possibilidades de aproveitamento dos resíduos descartados pelas minerações. Foram realizados levantamentos de dados, coleta de informações e amostras em campo e ensaios em laboratório, com a confecção de mapas compilados (geologia) e temáticos (áreas potenciais de produção de areia e brita).

1.1. OBJETIVOS

Este estudo visou a verificação de alternativas tecnológicas para a utilização dos resíduos gerados nas minerações de brita e areia, produzidos na RMSP. A partir de visitas e amostragens junto aos empreendimentos minerários, selecionados em função de alguns critérios (a serem discutidos mais adiante), os resíduos coletados foram analisados de forma a verificar potenciais usos para materiais ora descartados e responsáveis por grande problema ambiental e ônus econômico para o processo produtivo.

A princípio, os resíduos considerados nesta pesquisa compreenderiam todo material que atualmente não tem aproveitamento econômico, cujas características variam de acordo com os agregados produzidos, tipo de depósito mineral / método de lavra, e porte da mineração. No desenrolar da mesma, observou-se que algumas empresas produtoras de brita já operam com aproveitamento integral do material lavrado.

Visando estudos comparativos, decidiu-se por incluir nesta pesquisa a fração abaixo de 4,8 mm produzida pelas minerações de brita, com beneficiamento a seco ou à úmido, que pode ser considerado rejeito ou subproduto, dependendo do caso. Para as minerações de areia, o material estudado foi aquele resultante da classificação / peneiramento de areia no circuito industrial, com granulometria, em geral, inferior a 0,15 mm.

Desta forma, foram gerados dados e informações, além de apresentadas observações, sugestões e alternativas, como subsídio para a otimização do aproveitamento das matérias primas minerais.

1.2. JUSTIFICATIVAS

O estudo de alternativas de aplicação dos resíduos da mineração de agregados da RMSP pretende, através do desenvolvimento dos objetivos mencionados, sugerir alternativas para seu aproveitamento, contribuindo para solucionar alguns problemas ambientais e econômicos em cujo contexto está inserido.

Na mineração de brita, dependendo do processo de beneficiamento, alguns empreendimentos chegam a comercializar as frações mais finas produzidas no beneficiamento para uso na construção civil (pó de pedra e areia de brita). Em pedreiras que não possuem instalações adequadas para um maior aproveitamento dos seus resíduos, o material não diretamente comercializável é acumulado em pilhas, que, quando exposto ao tempo e à ação de águas pluviais costuma ser carregado para as drenagens, constituindo-se em tradicionais problemas ambientais associados à pedreiras. Os resíduos finos também podem ser acumulados em bacias de decantação, estando estas quase sempre com comprometimento de sua capacidade de acumulação.

Nas minerações de areia em cava seca, o resíduo significa expressiva parcela do material minerado, sendo constituído pelas frações silte e argila com mineralogia variada, e é acumulado em bacias de decantação ou mesmo liberado diretamente para as drenagens. As questões ambientais relacionadas à geração de tais resíduos se prendem a interferências em mananciais de águas e nas drenagens, e sua redução seguramente contribuiria para melhor preservação dos mesmos.

Nos portos de areia em cava submersa ou leito de rio, onde a areia é extraída a partir de sedimentos recentes (aluviões e terraços), o material não aproveitado são os finos de mesma granulometria, com mineralogia predominantemente silicática, os quais normalmente retornam ao local de origem simultaneamente à extração da areia. Desta forma, os estudos voltaram-se essencialmente às mineradoras em cavas secas.

A partir das considerações acerca dos resíduos da mineração de agregados apresentadas, pretende-se com esta pesquisa ***fornecer subsídios para maximizar o aproveitamento dos recursos minerais, como uma contribuição à sociedade em geral e tentativa de possibilitar ao empreendimento mineiro a utilização***

integral de suas reservas, bem como reduzir efeitos ambientais relacionados ao descarte ou acúmulo dos materiais residuais. A idéia básica foi converter o passivo ambiental contido nos resíduos em produtos, e subordinadamente criar alternativas de abastecimento de matérias-primas minerais para alguns setores de indústrias de aplicação, especificamente as Indústrias da Construção Civil e Pavimentação, Cerâmica e do Vidro.

1.3. DIAGNÓSTICO DA RMSP

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) é a terceira maior metrópole do mundo, corresponde a 0,09% do território nacional e 3,5 % do território paulista, o que significa uma área de 8.051 km² (FIGURA 1.1), com 2.139 km² de urbanização (EMPLASA 2000). Abrange atualmente 39 municípios, listados na TABELA 1.2.

TABELA 1.2 - Municípios da RMSP

Município	km ²	Distância*	Município	km ²	Distância*
Arujá	96	37	Mairiporã	307	31
Barueri	61	29	Mauá	67	26
Biritiba Mirim	414	71	Mogi das Cruzes	731	50
Caieiras	104	30	Osasco	68	18
Cajamar	132	38	Pirapora do Bom Jesus	99	48
Carapicuíba	36	24	Poá	17	34
Cotia	325	33	Ribeirão Pires	107	33
Diadema	32	17	Rio Grande da Serra	33	38
Embu	68	26	Salesópolis	418	93
Embu-Guaçu	171	42	Santa Isabel	361	52
Ferraz de Vasconcelos	25	32	Santana do Parnaíba	179	35
Francisco Morato	45	42	Santo André	179	18
Franco da Rocha	143	35	São Bernardo do Campo	411	20
Guararema	262	75	São Caetano do Sul	12	11
Guarulhos	334	15	São Lourenço da Serra	192	53
Itapecerica da Serra	136	33	São Paulo	1509	-
Itapevi	88	39	Suzano	185	37
Itaquaquecetuba	83	31	Taboão da Serra	20	15
Jandira	22	32	Vargem Grande Paulista	29	44
Juquitiba	550	70			

Fonte: EMPLASA (1984).

* Distâncias rodoviárias dos municípios à capital (menor percurso); Marco Zero / Praça da Sé.

A primeira definição legal da RMSP data da década de 60, mediante os Decretos nº 47.863 de 29/03/67, 48.162 de 03/07/67, ano em que foi oficialmente estabelecida a divisão do Estado de São Paulo em Regiões Administrativas. Os Decretos visaram definir diretrizes para uma Política de Regionalização de Administração Estadual, com o objetivo de conferir maior racionalidade às suas atividades e administração básicas. Os critérios que orientaram esta divisão regional foram:

- Utilidade para racionalização da Administração Pública Estadual;
- Limites físicos da Região, considerando também a polarização urbana e suas áreas de influência; e
- Critérios especiais relativos à áreas que exijam tratamento diferenciado quanto às atividades de planejamento e execução governamentais.

Da aplicação desses critérios, resultou uma divisão do Estado em 10 regiões, atualmente correspondendo a 15 regiões administrativas (SEADE 2000), sendo que a RMSP foi considerada de modo especial, por suas características de pólo de desenvolvimento estadual e nacional. As unidades territoriais polarizadas (Regiões Administrativas) são áreas geográficas definidas em diferentes escalas, envolvendo vários municípios interdependentes social e economicamente, e associadas a um pólo urbano principal. A instituição formal da Grande São Paulo como Região Metropolitana ocorreu em 1973 com a promulgação da Lei Federal Complementar nº 14 de 08/06/73, e leis estaduais completares nº 94/74 e 144/76.

Os indicadores sócio-econômicos básicos fornecidos pela EMPLASA (2000) mostram que a RMSP é responsável pela concentração de 17,2 milhões de habitantes, com um índice demográfico médio de 2.136 hab/km², a uma taxa de crescimento populacional anual de 1,46 % (de 1991 a 1996). Desta população 61 % se localiza no município de São Paulo; a população da RMSP corresponde a 10,6 % do total nacional e 48,6 % da população do Estado de São Paulo.

Os valores anuais de renda *per capita* do Brasil, Estado de São Paulo e RMSP são, respectivamente, US\$ 5,038, US\$ 8,232 e US\$ 8,758. O Produto Interno Bruto (PIB) da RMSP é de US\$ 147 bilhões, fração equivalente a 18 % do PIB brasileiro e 52 % do PIB do Estado de São Paulo (EMPLASA, *op.cit.*).

2. CONTEXTO REGIONAL

A RMSP está inserida no contexto geológico e geomorfológico regional apresentado a seguir. A abordagem dada aos temas não é baseada em nenhuma das tendências teórico-metodológicas existentes e não entra em discussões relativas à estratigrafia, cronologia ou gênese, contendo apenas a compilação de dados bibliográficos, que serve de base para os trabalhos desenvolvidos.

2.1. GEOLOGIA

Diversos autores têm estudado as rochas cristalinas pré-cambrianas e os sedimentos terció-quaternários aflorantes na Região Metropolitana de São Paulo. Ao longo das últimas décadas foi gerada grande quantidade de informações a respeito destas unidades litológicas, em enfoques regionais e locais. Dentre estes trabalhos, destacam-se COUTINHO (1980), RICCOMINI (1989), JULIANI (1993), SABESP/CEPAS (1994), TAKIYA (1997), RODRIGUEZ (1998), e SANT'ANNA (1999).

A RMSP está situada no domínio de rochas do embasamento cristalino pré-cambriano, com recobrimento parcial de sedimentos terciários da Bacia de São Paulo e sedimentos aluvionares associados a drenagens atuais ao longo dos principais rios que drenam a região.

2.1.1. Embasamento cristalino

O embasamento da RMSP situa-se no Cinturão de Dobramentos Ribeira, (HASUI *et al.* 1975). É constituído por rochas supracrustais, de baixo a médio grau metamórfico, e por rochas predominantemente gnáissico-migmatíticas, sendo estas últimas o substrato das supracrustais. Observam-se gnaisses, xistos, filitos, anfibolitos, quartzitos, milonito-gnaisses, blastomilonitos, milonitos, e migmatitos com estruturas diversas. Corpos graníticos de diferentes gerações intrudiram estas rochas, referentes ao Ciclo Tectônico Brasileiro, ou oriundos de retrabalhamento de rochas mais antigas. As rochas do embasamento encontram-se recortadas por um sistema de falhamentos transcorrentes de caráter dextral (SADOWSKI 1984, *apud* RICCOMINI 1989), ativos até o final do Ciclo Brasileiro, no Cambro-Ordoviciano.

Ao norte da Bacia de São Paulo, as rochas gnáissico-migmatíticas de médio e alto grau metamórfico, de idades variadas (de arqueana a neoproterozóica), são chamadas de Complexo Amparo. O Complexo é constituído por gnaisses com granada, hornblenda e biotita, migmatizados em intensidade variável, além de quartzitos, xistos, anfibolitos, rochas calcio-silicáticas e granulitos subordinados (ALMEIDA *et al.* 1981, *apud* JULIANI 1993).

Os metassedimentos situados ao sul e sudoeste da bacia foram reunidos nos Complexos Pilar e Embu, como pertencentes ao Grupo Açungui, sendo que apenas o segundo aflora na RMSP. O Complexo Embu é formado predominantemente por gnaisses e migmatitos oftálmicos, com bandas xistosas e inclusões subordinadas de xistos e metabásicas, com núcleos possivelmente mais antigos que os migmatitos brasileiros (HASUI & SADOWSKI 1976, *apud* JULIANI *op.cit.*).

Na região norte da Bacia de São Paulo verifica-se, essencialmente, a presença de filitos considerados como pertencentes ao Grupo São Roque, que foi recentemente subdividido em Grupo Serra do Itaberaba (vulcano-sedimentar, clasto-químico e clástico) e São Roque (essencialmente clástico). A idade das deformações, metamorfismo e granitogênese destes grupos é do Proterozóico Superior (TASSINARI *et al.* 1988, SADOWSKI & TASSINARI 1988, *apud* JULIANI *op.cit.*).

O Grupo São Roque é constituído por filitos róseos, alaranjados, castanhos ou avermelhados, quando alterados, e cinza esverdeados claros a escuros, quando frescos. Apresentam estruturação rítmica, bandada ou laminada dadas pela alternância de leitos mais ou menos quartzosos. Foram metamorfizados na fácies xisto verdes de baixa pressão, por vezes com grau metamórfico mais elevado devido à ação termal de rochas granitóides (JULIANI, SCHORSCHER & BELJAVSKIS, 1986 *apud* JULIANI 1993). É limitado pelas falhas de Taxaquara-Jaguari e Serra Lagoa, a sul, e pelo complexo de falhamento de Jundiuvira a norte. Observa-se, além da predominância dos filitos (que envolvem corpos graníticos), anfibolitos, mica xistos, quartzitos, metacalcários, metadolomitos, gnaisses, rochas calciossilicáticas e dioritos.

O Grupo Serra do Itaberaba caracteriza-se pela presença de grande variedade de metamorfitos, principalmente os originados por atividades vulcânicas e vulcanoclásticas. Observam-se metapsamitos (com predominância de quartzitos

puros a arcoseanos, metassedimentos químicos e/ou organo-químicos), formações ferríferas e rochas calciossilicáticas, e por metapelitos e rochas metabásicas, associadas a metaintermediárias e metavulcanoclásticas. Encontram-se metamorfisados em fácies xisto verdes superior a anfibolito, de pressão intermediária, predominando a fácies anfibolito médio (JULIANI 1993).

As rochas granitóides ocupam grandes extensões da faixa pré-cambriana. São formadas por tipos diversos de granitos, granodioritos, monzogranitos, granitóides indiferenciados, em parte gnáissicos, geralmente porfiróides, com características sin, tardi ou pós-tectônicas, comumente de idade proterozóica superior. São caracterizadas como corpos de diferentes tamanhos, desde batólitos a pequenos *stocks* (RODRIGUEZ 1998). Estes batólitos (Cantareira, Itaqui, Agudos Grandes, Itapeçerica, Três Lagos, Guacuri, Mauá, Cidade Líder, Itapeti, Mogi das Cruzes), distribuem-se na periferia da bacia, sustentando elevadas serranias (Piracaia, Cantareira, Itaqui, Taxaquara, Caucaia, Taquaxiara, Itapeti).

Sobre as rochas cristalinas do embasamento ocorre grande espessura de um manto resultante da ação intensa de intemperismo, observando-se, com isso, relativamente poucos afloramentos de rocha fresca. IPT (1996a) sugere que a formação destes espessos horizontes de alteração, a partir do desenvolvimento de superfícies de aplainamento neogênicas e paleogênicas, pode indicar fontes potencialmente produtoras de bens minerais, tais como: areia, caulim e argila.

2.1.2. Bacia de São Paulo

A bacia sedimentar de São Paulo é unidade integrante do denominado *Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB)*, uma feição tectônica de idade cenozóica, disposta segundo ENE como uma faixa alongada e deprimida, desenvolvida entre as cidades de Curitiba (PR) e Barra de São João (RJ), por cerca de 900 km de extensão (RICCOMINI 1989). A bacia é um *hemi-graben*, basculada para NNW, e juntamente com as Bacia de Taubaté, Resende e Volta Redonda constitui a porção mais expressiva do RCSB, por conter a maior área de exposição dos sedimentos terciários.

Os sedimentos da Bacia de São Paulo espalham-se por uma área aproximadamente ovalada, com distribuição irregular em cerca de 1.500 km². À norte, exhibe borda retilínea, marcada pelo sistema de falhas Taxaquara – Jaguari. À

sul, observam-se contatos irregulares com o embasamento pré-cambriano. Seus eixos maior (60 km) e menor (25 km) dispõem-se, respectivamente, entre as localidades de Arujá e Interlagos, Santo André e Santana. São, ainda, observadas ramificações ao sul de Interlagos, para Bororé e Cipó, e a leste, de Itaquaquecetuba para Mogi das Cruzes, Biritiba Mirim e Salesópolis.

RICCOMINI (1989) interpreta estas bacias segundo a litoestratigrafia e evolução tectono-sedimentar, a partir do estudo de sistemas deposicionais e fácies, associado à identificação de estruturas tectônicas geradoras e deformadoras dos depósitos sedimentares. Desta forma, foi apresentada a evolução tectono-sedimentar do RCSB (FIGURA 2.1), observando-se na área das Bacias de São Paulo e Taubaté. Na base, situa-se o Grupo Taubaté, com as Formações Resende, Tremembé e São Paulo, sobreposto pela Formação Itaquaquecetuba, e no topo a Formação Pindamonhangaba.

FIGURA 2.1 – Quadro litoestratigráfico do Rift Continental do Sudeste do Brasil (RICCOMINI et al. 1996, apud SANT'ANNA 1999).

Estes sedimentos são recobertos por depósitos colúvio-aluviais quaternários (MELO *et al.* 1987 e SALVADOR 1994 *apud* SANT'ANNA 1999), já dissociados da evolução terciária das bacias. As formações terciárias apresentam maior expressão, em geral, na Bacia de Taubaté, sendo que a Formação Pindamonhangaba aflora apenas nesta bacia, enquanto a Formação Itaquaquecetuba está presente apenas na Bacia de São Paulo.

2.1.2.1. Formação Resende

A Formação Resende compreende um sistema de leques aluviais associados a planícies de rios entrelaçados, predominando lamitos na fácies distal, por vezes associados a arenitos e conglomerados. Na fácies proximal, predominam conglomerados polimíticos, brechas e diamictitos, que alcançam até 200 metros de espessura, denominada por MELO (1997) de Formação Itatiaia.

A Formação Resende apresenta idade oligocênica (LIMA *et al.* 1994, LIMA & MELO 1994 e YAMAMOTO 1995 *apud* SANT'ANNA 1999). É a unidade de maior expressão em volume de sedimentos na Bacia de São Paulo, representando mais de 80 % do seu preenchimento sedimentar.

Os lamitos têm expressiva ocorrência dentro da unidade, principalmente em superfície; caracterizam-se por apresentar matriz argilo-arenosa abundante, envolvendo, em sua maioria, grânulos e seixos de quartzo do arcabouço. Em geral, apresentam coloração acinzentada, esverdeada e avermelhada, com manchas arredondadas a irregulares de constituição mais argilosa.

RICCOMINI (1989) apresenta a seguinte descrição das fácies:

- × diamictitos e conglomerados polimíticos, ocasionalmente monomíticos, contendo seixos e matacões (angulosos a subarredondados), matriz lamítica e arenosa arcoseana e de coloração esverdeada;
- × lamitos arenosos e argilosos, de coloração esverdeada, em corpos tabulares;
- × arenitos grossos a médios, mal selecionados, com estratificações cruzadas acanaladas de médio porte, constituindo corpos tabulares de espessuras métricas a decimétricas. Localmente intercalam-se níveis conglomeráticos com seixos de quartzo, feldspato e rochas do embasamento;

- ✖ sedimentos siltico-argilosos, laminados, com abundante matéria orgânica, de cor acinzentada, quase preta; e
- ✖ calcários calcíticos (calcretes) associados aos sedimentos lamíticos arenosos e argilosos. Desenvolvem-se como crostas duras ou nódulos, em camadas decimétricas a métricas, ou preenchimento de rachaduras de ressecção com espessura centimétrica.

2.1.2.2. Formação Tremembé

A Formação Tremembé compreende um sistema lacustre do tipo *playa-lake*, com mais expressiva ocorrência na porção central da Bacia de Taubaté e uma pequena ocorrência na parte centro-norte da Bacia de São Paulo (RICCOMINI & COIMBRA 1992, *apud* SANT'ANNA 1999). Na Bacia de São Paulo, são verificadas camadas tabulares de argilas siltosas de coloração preta a cinza esverdeado, com espessuras de até 60 metros (TAKIYA 1991). Segundo LIMA & MELO (1989), a idade desta formação é oligocênica.

2.1.2.3. Formação São Paulo

A Formação São Paulo compreende um sistema fluvial meandrante, com planície de inundação bem desenvolvida, e está presente nas bacias de São Paulo, Resende e porção sudeste da Bacia de Taubaté. Tem importante ocorrência na Bacia de São Paulo, onde seus depósitos encontram-se comumente associados a couraças ferruginosas sustentando altas colinas, como verificado no espigão central da cidade de São Paulo (Av. Paulista – Sumaré). A Formação São Paulo apresenta idade oligocênica (TAKIYA 1991), e as maiores espessuras observadas encontram-se em torno de 100 metros.

Segundo RICCOMINI (1989), a esta formação pertencem:

- ✖ arenitos grossos, conglomeráticos, com estratificações cruzadas, base erosiva e presença de clastos argilosos;
- ✖ siltitos e argilitos laminados, às vezes fossilíferos (linhitos); e
- ✖ arenitos médios a grossos, gradando para sedimentos mais finos.

2.1.2.4. Formação Itaquaquetuba

A Formação Itaquaquetuba (COIMBRA *et al.* 1983 e RICCOMINI & COIMBRA, 1992, *apud* SANT'ANNA 1999) é representada por um sistema fluvial entrelaçado, com sedimentos associados a leques aluviais. Ocorre na Bacia de São Paulo em Itaquaquetuba, Raia Olímpica da USP, Rio Pinheiros e Barueri (MELO *et al.* 1987). Em algumas áreas, observa-se elevada porcentagem de areia (superior a 70 %), e baixa porcentagem de argila ou lamito (TAKIYA 1991). A idade para esta formação é indicada como paleogênica (MELO *et al.* 1985 e LIMA *et al.* 1991)

Na Formação Itaquaquetuba, observam-se as seguintes litofácies (RICCOMINI 1989):

- ✖ arenito médio a fino, maciços, mal selecionados, com estrutura almofadada;
- ✖ lamitos maciços e siltitos arenosos, associados à fácies anteriormente descrita; e
- ✖ folhelhos siltosos a arenitos marrom escuros, em blocos subangulares, com até 3 metros de espessura, e pedaços de tronco fósseis, além de clastos menores, de quartzo e quartzito em sua maioria, com dimensões centimétricas até decimétricas.

2.1.3. Unidades Quaternárias

Correspondem a depósitos ao longo de vertentes e a extensas planícies aluviais associadas aos principais rios da RMSP (Tietê, Pinheiros e Tamanduateí), estas presentes também ao longo das drenagens de menor porte. Compreendem predominantemente colúvios argilo-arenosos, com lentes mais argilosas ou conglomeráticas, ocasionalmente exibindo madeira fóssil, e aluviões subordinados constituídos por conglomerados basais sobrepostos por areias grossas a conglomeráticas com estratificações cruzadas. Os aluviões gradam para areias finas a médias, com porções de argilas arenosas, podendo ocorrer também fragmentos de madeira fóssil nestes dois últimos pacotes.

Os depósitos holocênicos são representados por coluviões e aluviões de várzea e baixos terraços, com espessura raramente ultrapassando 10 metros. As coberturas coluviais holocênicas são descontínuas e de pequena espessura, embora com distribuição generalizada. Ocorrem também cascalheiras com seixos

arredondados de quartzo e quartzito (*stone lines*), separando estes depósitos coluviais de rochas do embasamento ou de sedimentos terciários.

2.1.4. Mapa Geológico

O mapa geológico da RMSP (**FIGURA 2.2**) apresenta a compilação feita, e gentilmente cedida para este trabalho, pelo Projeto Banco de Dados Espaciais da Bacia do Alto Tietê (PROJETO ALTO TIETÊ 1999), executado pelo Laboratório de Informática Geológica do IGc-USP, elaborado através de escaneamento dos originais das 22 folhas 1:50.000, georreferenciamento das imagens para sistema UTM, digitalização manual em tela dos contatos e linhas estruturais, e generalização final para 1:250.000. A base de dados utilizada foi o mapeamento do Projeto Diagnóstico Hidrogeológico da Região Metropolitana de São Paulo (SABESP/CEPAS 1994), coordenado pelo Prof. Cláudio Riccomini (IGc-USP).

Este trabalho não apresenta a cobertura total da RMSP, tendo ficado incompleto nas áreas limítrofes, a sul do município de Juquitiba, e a norte dos municípios de Mairiporã e Santa Isabel. Como não havia empreendimentos minerários localizados nestas lacunas, optou-se por não preenchê-las com outro trabalho de mapeamento realizado na região, com menor detalhe.

O projeto Diagnóstico Hidrogeológico da RMSP agrupou as unidades litoestratigráficas em duas grandes unidades cronoestratigráficas (Proterozóico e Cenozóico) e as subdividiu por litologias, sem a separação das unidades pré-cambrianas. Para esta pesquisa, que não compreendeu a execução de mapeamento de detalhe, foi mantido este critério, pois mapas com destaque de unidades potencialmente aproveitáveis como matéria-prima para a indústria de agregados são feitos principalmente a partir de dados litológicos e não necessariamente levam em consideração a estratigrafia ou outras formas de subdivisão comumente adotadas, tais como nos trabalhos citados nos itens anteriores. Os mapas finais encerram os trabalhos iniciados por OLIVITO (2000), colaborador desta pesquisa.

Desta forma, as unidades litológicas representadas no mapa geológico (**FIGURA 2.2.**) são:

PROTEROZÓICO

- pCf** Predominância de filitos, ocorrendo subordinadamente xistos;
- pCq** Predominância de quartzitos, com ocorrências subordinadas de metassiltitos e xistos;
- pCx** Predominância de micaxistos, com quartzitos e metassiltitos subordinados, localmente feldspáticos;
- pCg** Rochas granitóides predominantemente maciças, de granulação variada;
- pCgo** Rochas granitóides predominantemente orientadas e/ou foliadas, de granulação variada, incluindo porções gnáissicas, migmatíticas e plastomiloníticas subordinadas;
- pCgn** Rochas predominantemente gnáissicas, incluindo, localmente, porções de rochas granitóides orientadas, xistos feldspatizados e milonitos diversos subordinados;
- pCa** Anfibolitos;
- pCc** Rochas carbonáticas.

TERCIÁRIO (OLIGOCENO)

(as formações Tremembé e Itaquaquecetuba, apesar de ocorrerem na RMSP, foram descritas após o mapeamento realizado, e não se encontram na descrição e no mapa geológico)

Formação São Paulo

- Osp** Sedimentos formados em sistema fluvial meandrante, com litofácies de arenitos grossos, conglomeráticos, com granodecrescência ascendente para siltitos e argilitos e de arenitos de granulação média a grossa, com granodecrescência para sedimentos arenosos progressivamente mais finos até siltitos e argilitos.

Formação Resende

- Orf** Depósitos fanglomeráticos (leques aluviais) com predominância de lamitos arenosos a argilosos;
- Orl** Depósitos relacionados à planície aluvial de rios entrelaçados (*braided*), com predominância de lamitos seixosos.

QUATERNÁRIO

- Qa** Colúvios areno-argilosos, com lentes mais argilosas ou conglomeráticas, e aluviões subordinados constituídos por conglomerados basais sobrepostos por areias grossas a conglomeráticas, com estratificações cruzadas, gradando para areias finas a médias. Ocorrem em planícies aluviais associadas aos rios da região.

LOCALIZAÇÃO DA ÁREA NO ESTADO DE SÃO PAULO

LEGENDA

- QUATERNÁRIO**
Depósitos sedimentares aluviais, predominantemente areno-argilosos
- TERCIÁRIO**
Formação São Paulo
Depósitos de sistema fluvial meandrante, compostos de cascalho
Formação Resende
Depósitos de sistemas de leques aluviais e planície fluvial entrelaçada, com predominância de lamitos seixosos
Depósitos de sistemas de leques aluviais com predominância de lamitos seixosos
- PROTEROZÓICO**
Filitos e xistos subordinados
Quartzitos com ocorrência de metassiltitos e xistos
Micaxistos com metaquartzitos e metassiltitos subordinados
Rochas granitóides máficas
Rochas granitóides foliadas ou alteradas
Rochas predominantemente gnáissicas
Anfibolitos
Rochas metacarbonáticas

CONVENÇÕES

- Sede do Município
Limite de Município
Drenagens
Reservatórios

Fonte: base cartográfica adaptada de IPT (1998)
base geológica adaptada de SABESP/CEPAS (1994),
Projeto Alto Tietê (1999) e OLIVITO (2000)

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA SEDIMENTAR E AMBIENTAL			
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO			
CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE RESÍDUOS DA MINERAÇÃO DE AGREGADOS DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO, VISANDO SEU APROVEITAMENTO ECONÔMICO			
MAPA GEOLÓGICO DA RMSP			
DATA	Outubro / 2000	ESCALA	1 : 400.000
TÍTULO	FIGURA 2.2		
MESTRANDA	GLÁUCIA CUCHIERATO		

CAPÍTULO 2 - CONTEXTO REGIONAL

2.1.5. Unidades litológicas exploradas

Para a produção de agregados minerais destinados à indústria da construção civil são utilizadas apenas algumas unidades geológicas características. Na RMSP, a produção de pedra britada concentra-se no domínio geológico das rochas do embasamento cristalino, de idade pré-cambriana (proterozóica). As principais unidades geológicas, cujas rochas são aproveitadas para brita, são rochas granitóides maciças, foliadas ou orientadas, e em menor escala, rochas gnáissicas. Estas litologias se encontram expostas em áreas limítrofes à Bacia de São Paulo, em altos topográficos, geralmente com pouca ou nenhuma cobertura vegetal, variando a espessura do manto de alteração das rochas de acordo com a evolução pedológica da região. Nota-se, localizadamente, a utilização de rochas carbonáticas como fontes de matéria-prima para a produção de britas.

A produção de areia, por sua vez, se dá a partir de um maior número de unidades geológicas, com ocorrência de depósitos minerais em vários ambientes. Os principais depósitos de areia explorados são os formados a partir de processos naturais de intemperismo, erosão, transporte e sedimentação. Na RMSP os depósitos de areia, explotados principalmente para uso na construção civil, encontram-se em porções arenosas de planícies aluviais, depósitos de sistema fluvial meandrante, e espessos mantos de alteração *in situ* de rochas granitóides.

No capítulo 6, onde são feitas considerações a respeito das características das rochas-fonte de matéria-prima para a indústria de agregados na RMSP, podem ser visualizados os mapas temáticos, onde foram separadas as unidades de interesse para este estudo.

2.2. GEOMORFOLOGIA

A RMSP localiza-se integralmente no Planalto Paulistano definido por ALMEIDA (1958). Em 1964, o mesmo autor subdividiu a geomorfologia do Estado de São Paulo, baseada em aspectos topográficos, estruturais e genéticos, e relacionou a origem do Planalto Paulistano à destruição da Superfície do Japi, considerada de idade paleogênica, e à instalação da Superfície do Alto Tietê, esta de idade polêmica segundo o autor, mas mais jovem que a do Japi. A Superfície do Japi é destacada pelo nivelamento das serranias quartzíticas ao norte da Bacia de São Paulo. Estas

superfícies de erosão e aplainamento servem para datações relativas e correlações locais e regionais das unidades sedimentares.

O Planalto Paulistano apresenta a maior parte do seu território drenada pela bacia do Alto Tietê, cujas nascentes estão localizadas nas abas continentais da Serra do Mar. Além do Tietê, a RMSP é drenada também pelos rios Pinheiros, Tamanduateí e seus tributários. Parte de outras bacias hidrográficas também estão inseridas na RMSP: à nordeste, no município de Santa Isabel, bacia do rio Parateí, afluente da margem esquerda do rio Paraíba; na vertente Atlântica, no Alto da Serra de Paranapiacaba, a bacia do rio Capivari e bacia do rio Monos; e no extremo sul e no extremo sudoeste, a bacia do rio São Lourenço, afluente do rio Juquiá.

A Serra do Mar, ao sul da RMSP é o divisor da Drenagem Atlântica em relação à drenagem centrípeta da Bacia do Paraná, à qual pertence o rio Tietê. Desse divisor de águas até o Maciço da Bonilha (850-1.050m), em uma extensão de 15 km para o interior, há uma superfície de aplainamento parcial, esculpida em micaxistos e gnaisses das formações pré-cambrianas regionais. Esse maciço separa a superfície cristalina do alto da Serra, das colinas tabuliformes da Bacia Sedimentar de São Paulo. Os traçados hidrográficos (leste-oeste) desta área são cursos diretamente relacionados com as estruturas dos maciços da região, representados pelos rios Grande, Jurubatuba e Pequeno, que constituem as cabeceiras do rio Pinheiros. O rio Guarapiranga, primeiro e maior afluente do Pinheiros pela margem esquerda, tem as cabeceiras dendríticas, localizadas no alto da Serra de Paranapiacaba.

A Serra da Cantareira, bem como o Morro do Jaguaré, representam antigos batólitos que passaram por processos recentes de entalhamento e dissecação das superfícies de aplainamento anteriores. Como resultado, verifica-se a existência de uma drenagem dendrítico-retangular em detalhe, cujo aspecto geral apresenta um padrão radial disperso, a partir do cume destes acidentes geográficos. A Serra do Itapevi (1.050-1.120m), ao norte de Mogi das Cruzes, é o divisor das águas dos rios Tietê e Parateí.

A Bacia Sedimentar de São Paulo apresenta uma topografia colinosa onde se sobressai o espigão central – divisor de águas do Tietê e Pinheiros. Apresenta uma altitude média de 750 metros acima do nível do mar, com limites inferior e superior em 715 a 900 metros, e tem predominância de um relevo suave e colinoso (*sistema*

de colinas de AB'SABER, 1980), apesar de intensamente alterada pela ação antrópica. É limitada pelo Alto Vale do Rio Paraíba (750-1.110 metros), pela Serra de Paranapiacaba (850-1.050 metros), pelos contrafortes Ocidentais da Mantiqueira denominados localmente de Serra da Cantareira (1.000-1.800 metros), pelos maciços do Grupo São Roque (850-1.275 metros) e pelas cabeceiras do Tietê (850-950 metros). AB'SABER (1957) atribuiu a deposição das "camadas São Paulo" após a rápida erosão e entalhamento vertical sofridos por uma superfície de aplainamento intermediária (com altitudes entre 900 e 950 metros). HASUI & CARNEIRO (1980) indicam a origem da bacia pela ação de uma rede fluvial de escoamento dificultado, em função da combinação de mecanismos de soleira tectônica sin-sedimentar, ou uma bacia "fluvio-lacustre de soleira tectônica" conforme AB'SABER (1957)

O espigão central apresenta a principal área de exposição das concreções limoníticas da Formação São Paulo, que controla suas elevações, e vê-se fortemente dissecado pelas cabeceiras de seus afluentes, cujos altos cursos têm tendências nitidamente dendríticas. Com topos suaves, desta superfície descem patamares escalonados em direção aos rios Tietê e Pinheiros, bastante acidentados na faixa imediata ao topo, e mais suavizados próximos às várzeas, exceto nas seções dos vales afluentes. A drenagem geral da área, em se tratando de terrenos sedimentares permeáveis, difere daquela das áreas cristalinas pelo espaçamento maior entre os diversos cursos d'água, com padrão geral paralelo Sudoeste-Nordeste (afluentes do Tietê) e Sudeste-Noroeste (afluentes do Pinheiros).

As originais planícies aluviais meândricas dos rios Tietê e Pinheiros foram amplamente desfiguradas pelas ações humanas, tais como em retificações e inversões de correnteza. A original topografia da RMSP já não evidencia mais todas as feições de relevo descritas, pois a urbanização atinge o índice de 25 % de ocupação em relação à área total, o que pode ser visualizado na mancha urbana da **FIGURA 1.1**. A esculturação da atual conformação geomorfológica resulta da superimposição destes importantes rios e seus tributários à bacia sedimentar de São Paulo.

As áreas de planícies aluviais e regiões colinosas de bacias sedimentares é um controle para a instalação de cidades, segundo AB'SABER (1957), onde a maioria das feições originais do relevo acabam por ser modificadas, mas restringem-se a este ambiente. Anteriormente, os limites do sítio urbano de São Paulo não

ultrapassavam as colinas, terraços fluviais e áreas da planície de inundação situadas próximas às confluências dos rios Tietê e Pinheiros. Atualmente, verifica-se que a cidade ultrapassou estes limites, adentrando morros e morrotes sustentados por rochas do embasamento, sendo limitada por controles geomorfológicos apenas em ambientes extremos, como por exemplo a Serra da Cantareira na porção norte da RMSP. Segundo IBGE (1995, *apud* PELOGGIA 1998), a urbanização da RMSP corresponde a um processo de concentração populacional que envolve dois elementos: a multiplicação dos pontos de concentração da população, ou seja, o surgimento de novos núcleos urbanos, e o aumento do tamanho populacional de núcleos pré-existentes.

O aumento das atividades intrínsecas da ocupação urbana, com grandes movimentações de terra, aplainamento de morros e aterramento de terraços em antigas depressões e vales, eliminação da camada superficial do solo e da cobertura vegetal, e conseqüentes alterações significativas no ambiente natural, acabam por gerar muitos problemas e acidentes. À medida que os terrenos são mais acidentados, as chuvas e o escoamento superficial das águas promovem a lavagem do solo desprotegido. A erosão em sulcos e ravinas se tornam crônicas e, muitas vezes, são responsáveis por desmoronamentos, escorregamentos e até soterramentos. A malha viária nela instalada se torna intransitável, e as moradias de instáveis a condenadas, podendo até causar mortes. Com a grande mobilização de sedimentos pela ação da água, as drenagens acabam por assorear e diminuir a profundidade do leito dos rios. Estas são algumas das modificações do meio físico causadas pela ação antrópica, que modificam ativamente a geomorfologia dos centros urbanos, mas existem muitas outras.

A expansão urbana acaba por limitar a atividade extrativa mineral e mesmo esterilizar muitas das reservas minerais, devido a impossibilidade de requisitar novos direitos minerários nas áreas urbanizadas, e também devido à proximidade entre os bairros e a área de direito das minerações.

As **FOTOS 2.1 a 2.4** ilustram a situação observada em algumas das minerações visitadas. Este problema pode diminuir a disponibilidade de matérias-primas minerais e aumentar os preços dos mesmos, necessários para o desenvolvimento da própria sociedade, que promove estas alterações e impedimentos. Neste sentido, a utilização dos resíduos pode contribuir, e muito, para

a diminuição dos problemas de abastecimento de bens minerais na RMSP, uma vez que o aproveitamento do material descartado pelas minerações pode fazer com que seja reduzida a busca por materiais naturais.

FOTOS 2.1 e 2.2 - Aspectos de atividade da mineração, com a cidade ao fundo
(Serra da Cantareira - região norte do município de São Paulo).

FOTOS 2.3 e 2.4 - Observação da modificação do relevo com a expansão urbana
(Perus - região norte do município de São Paulo)

CAPÍTULO 3 - MINERAÇÃO DE AGREGADOS NA RMSP

3. MINERAÇÃO DE AGREGADOS

Apesar do seu baixo valor unitário, o setor de agregados contribui com parcela importante do movimento financeiro da indústria mineral do país. Excluindo os minerais energéticos, as pedras britadas ocupam atualmente no Brasil (MINÉRIOS & MINERALES 2000) o segundo lugar em valor de produção mineral e terceiro em quantidade produzida (84,8 milhões de m³) e a areia ocupa o terceiro lugar em valor de produção e segundo em quantidade produzida (135,7 milhões de m³). A quantidade produzida e o valor da produção de agregados fazem com que o Estado de São Paulo ocupe o segundo lugar na produção mineral nacional, ficando apenas atrás de Minas Gerais.

A partir de dados oficiais divulgados pelo DNPM (Departamento Nacional da Produção Mineral), o periódico MINÉRIOS & MINERALES divulgou em 1998, 1999 e 2000 a situação das minerações em atividade no Brasil dos anos anteriores (vide FIGURA 3.1).

FIGURA 3.1 – Minerações em atividade no período 1997-1999

Em 1997, das 1.372 minerações em atividade, **69,1 %** estão ligadas ao setor de construção civil sendo o setor de agregados responsável por **33,1 %** (453 minas).

isto considerando-se apenas os empreendimentos que produzem valores acima de 10.000 m³/mês. Para o ano de 1998, das 1.553 minas ativas, **72,6 %** estão ligadas à indústria da construção civil e o setor de agregados (areia e brita) corresponde a **39,5 %** (613 minas). Em 1999, o valor da participação do setor de construção civil subiu para **80,0 %** do total de minas ativas (1611), ficando os agregados com **45,2 %** (23,2 % para brita e 22 % para areia).

3.1. DEFINIÇÕES

Os agregados são *materiais granulares, sem forma e volume definidos, de dimensões e propriedades adequadas para uso em obras de engenharia civil* (OLIVEIRA & BRITO 1998). Podem ser classificados quanto à sua origem (naturais/artificiais), densidade (leves/normais/pesados) e o tamanho dos fragmentos (grãos/miúdos). A classificação quanto à origem dos fragmentos destaca-se por considerar a brita e a areia resultantes de britagem na classe dos agregados artificiais. A classificação quanto ao tamanho dos fragmentos é a mais importante para fins de utilização prática, e será adotada neste trabalho para a caracterização dos materiais produzidos e/ou descartados no setor de agregados.

Segundo o dicionário AURÉLIO (FERREIRA 1986), que apesar de não ser uma publicação técnica-científica é utilizável pela sua grande abrangência, o termo agregado é definido como *material granular inerte (pedra, areia, etc.), que participa da composição de concretos, argamassas e alvenarias, e cujas partículas são ligadas entre si por um aglutinante*. Nesta mesma publicação, *agregado grão* corresponde à classe de agregado cujo diâmetro máximo é superior a 4,8 mm e que compreende a brita, a pedra de mão e o pedregulho natural, e o *agregado miúdo*, à classe de agregados cujo diâmetro máximo é inferior a 4,8 mm e compreende a areia, o pó de pedra e o pedrisco.

Segundo a definição da norma 7225 (ABNT 1993), agregado é o *material natural, de propriedades adequadas ou obtido por fragmentação artificial de pedra, de dimensão nominal máxima inferior a 100 mm e de dimensão nominal mínima igual ou superior a 0,075 mm*. As terminologias dos agregados de acordo com esta mesma norma da ABNT define as classes verificadas na **TABELA 3.1**.

TABELA 3.1 – Terminologia segundo ABNT

NOMENCLATURA	DEFINIÇÃO
Agregado graúdo	Pedra britada, brita ou pedregulho muito grosso, grosso e médio, de dimensões nominais compreendidas entre 100 e 4,8 mm
Agregado miúdo	Pedregulho fino, pedrisco grosso, médio e fino, areia grossa, média e fina, de dimensões nominais compreendidas entre 4,8 e 0,075 mm
Pedra britada	Material proveniente de britagem de pedra, de dimensão nominal máxima inferior a 100 mm e de dimensão nominal mínima igual ou superior a 4,8 mm.
Pedrisco	Material proveniente de britagem de pedra, de dimensão nominal máxima inferior a 4,8 mm e de dimensão nominal mínima igual ou superior a 0,075 mm.
Areia	Material natural, de propriedades adequadas, de dimensão nominal máxima inferior a 2,0 mm e de dimensão nominal mínima igual ou superior a 0,075 mm.
Pó de Pedra	Material proveniente de britagem de pedra, de dimensão nominal máxima inferior a 0,075 mm.

Fonte: NBR 7225 (ABNT 1993)

A areia produzida no processo de cominuição e classificação da brita é denominada areia artificial ou industrial, segundo critérios de classificação pela origem e aplicação, respectivamente. É citada por alguns autores pelo termo *pó de pedra* (BAUERMEISTER 1996; CPRM 1997; dentre outros). Na prática, observa-se que este termo é utilizado para designar a fração resultante da separação do pedrisco limpo nos processos de beneficiamento a seco. BAUERMEISTER (*op.cit.*) considera como *pó de pedra* a areia resultante da lavagem da brita.

SBRIGHI NETO (1975) em seu trabalho sobre a natureza petrográfica da areia britada e seus finos em algumas propriedades do concreto, define *areia britada* como sendo o material com partículas menores que 9,52 mm resultante de britagem de rochas, e *finos* ou *pó de pedra*, o material com partículas menores que 0,15 mm resultante do mesmo processo. Neste mesmo trabalho, comenta-se que existe uma preferência em usar o termo “filler” para definir o material abaixo de 0,075 mm, proveniente de britagem de rochas.

SOARES & MENDES (1999) utiliza o termo “finos de pedreira” como o material *undersize* da produção de brita, situado abaixo de 4,8 mm. TERRA (2000) classifica o *pó de pedra* como o material situado abaixo dos 4,8 mm, que apresenta alta quantidade de material pulverulento (até 20%), e *areia de brita*, aquele mesmo pó de pedra, lavado, com redução significativa de finos, atingindo a faixa dos 6 %.

Adotando o critério apresentado acima, o termo **pó de pedra (FOTO 3.1)** será reservado neste trabalho para o material tradicionalmente conhecido no mercado, de diâmetro menor que 4,8 mm, comercializado a seco.

FOTO 3.1 – Pilha de estocagem do Pó de Pedra (BR29)

FOTO 3.2 – Pilha de estocagem do Pó de pedra (BR10)

Em pedreiras onde o beneficiamento é feito a úmido, serão adotados dois termos: a **areia de brita (FOTO 3.3)**, com fração intermediária entre 4,8 mm e 0,074 mm, com lavagem e conseqüente retirada da fração mais fina, e os **finos de pedreira (FOTO 3.4)**, de granulometria abaixo de 0,074, que permanece em suspensão na água e é descartado para bacias de decantação.

FOTO 3.3 – Circuito de classificação da areia de brita (BR09)

FOTO 3.4 – Bacia de decantação dos finos de pedreira (BR09)

As siglas utilizadas nas fotos se referem ao bem mineral explorado pela mineração (BR=brita, AR=areia) e ao número do empreendimento adotado nesta pesquisa. A lista das minerações e os mapas de localização se encontram no capítulo 6.

As propriedades da brita variam segundo o setor de aplicação da indústria de construção civil a ser utilizada, que podem ser: concreto, pavimentação, obras civis (ferrovias, túneis, barragens), obras de Infra-estrutura (saneamento, esgoto), dentre outras. As propriedades principais são aquelas que definem as características físicas (dureza, resistência a várias solicitações, densidade, porosidade, etc.), químicas (reatividade), e mineralógicas (tipo de rocha-fonte, minerais constituintes, etc...)

As propriedades principais da areia visando sua aplicação industrial são: a granulometria, o formato dos grãos, a composição mineralógica, ausência / presença de minerais e outros materiais que influenciem nas suas características físicas (p. ex.: dureza, cor e densidade), dentre outras. Existem várias definições e classificações de areia, cada uma baseada em um critério diferente, de acordo com o setor de conhecimento envolvido, tais como: granulométrico, mineralógico, textural, etc. FERREIRA (1996) considera o critério de aplicação e composição mineralógica, e adota o termo areia industrial para as areias que são utilizadas na indústria, inclusive na construção civil (concreto e argamassas). A maioria dos autores, porém, distingue a areia industrial, para fins mais nobres, daquela utilizada em larga escala nas obras de engenharia civil. Em países de língua inglesa este tipo de areia é denominada *building sand* (NSA 1999).

3.2. BENS MINERAIS PRODUZIDOS

A RMSP é caracterizada pela grande quantidade de empreendimentos mineiros instalados próximos a núcleos urbanos, com a produção voltada principalmente à aplicação na indústria da construção civil. Este estudo enfoca dois dos setores produtivos de maior consumo em áreas urbanas, com a produção de brita em pedreiras e a produção de areia em portos e empresas de mineração.

3.2.1. Brita

A brita ou pedra britada é um bem mineral que pode ser constituído de vários tipos de materiais rochosos, disponíveis nos locais de extração. De acordo com o tipo de brita, existe a necessidade de alguns requisitos básicos para adequar ao setor de aplicação a que se destina, mas, em geral, possui as características básicas dos agregados, descritas no início deste capítulo. Na RMSP, as pedras britadas são predominantemente originárias de rochas de composição granítica (granitos e gnaisses), correspondendo a cerca de 90 % do total de minerações. O restante explora brita de rochas calcárias e não chega a 10 % (apenas 03 empreendimentos).

A brita é obtida a partir da exploração de maciços rochosos e caracteriza-se como um material que, depois de sofrer desmonte por explosivos, britagem e classificação, pode ser usada *in natura*, ou misturada com outros insumos (cimento, asfalto, areia, etc.) e utilizada na construção civil. Segundo DNPM (2000) o uso de brita é distribuído no Brasil com 50 % para a produção de concreto, 30 % para pavimentação asfáltica, 13 % para produção de artefatos de cimento e pré-moldados e 7 % destinado a usos diversos.

Nas pedreiras, são bastante diversos os produtos classificados durante o beneficiamento da brita, variando também se o processamento ocorre a seco ou a úmido. Respectivamente, se a seco, costuma-se comercializar e/ou estocar o pó de pedra, e se a úmido, separar a areia de brita e enviar a "lama" para bacias de decantação. Em geral, produz-se o que há demanda do mercado, dentre os vários produtos que podem ser oferecidos, conforme detalhado mais a frente, no item 6.6.1.

3.2.2 Areia

A areia é conceituada na indústria como um bem mineral constituído predominantemente por quartzo de granulação fina e pode ser obtida a partir de depósitos de leitos de rios e planícies aluviais, rochas sedimentares e mantos de alteração de rochas cristalinas. De acordo com o tipo de depósito mineral, varia o processo de lavra, que pode ser por desmonte hidráulico, escarificação, ou simplesmente por dragagem. O beneficiamento da areia é bastante simples, baseado em classificação por peneiras, silos de decantação, e/ou hidrociclonação, que separam granulometricamente as frações interessantes aos setores de

aplicação. É comum, também, a comercialização do material mais grosso, separado nas primeiras peneiras estáticas, conhecido como cascalho, pedregulho ou pedrisco.

O termo areia tem também a conotação granulométrica; segundo CARUSO & SBRIGHI NETO (1983), areia é um material granular solto, não coesivo, constituído de partículas de dimensão 0,06 a 2,0 mm. Estes autores apresentam ainda a definição da ABNT para uso em engenharia civil, em que a definição da areia é: *solo constituído por grãos minerais cuja maioria aparente têm diâmetro entre 0,05 e 4,8 mm, caracterizando-se pela sua textura, compactidade e forma dos grãos.*

Neste trabalho, utilizou-se a definição de CARUSO & SBRIGHI (*op.cit.*), com as subdivisões em areia grossa (-2,0mm +1,2mm), média (-1,2mm +0,42mm) e fina (-0,42mm +0,074mm), e portanto limite inferior em 0,074mm. A utilização do intervalo dos diâmetros das frações dos materiais estudados com as referências (+) e (-) foi adotada devido a sua familiaridade nas minerações.

Nas minerações de areia que exploram o manto de alteração de rochas granitóides, geralmente a comercialização é feita sem classificações, e o material varia da fração grossa até a fina, dependendo da demanda do mercado, sendo que resultam apenas os finos (fração - 0,15 mm ou -0,074 mm), depositados em bacias de sedimentação.

Nas minerações com exploração a partir de rochas sedimentares, a areia é comercializada nas frações grossa e média (conjuntamente), sem classificação, e a areia fina é produzida em pequena escala, apenas quando a demanda exige. Quando não há saída deste material, a areia fina pode ser vendida misturada com a areia média e grossa, se não houver especificação do cliente, ou vai com os finos para as bacias de decantação, onde o material residual é depositado.

Nos portos de areia em leito de rio e cava submersa, praticamente todo o material extraído é comercializado, e os resíduos (predominantemente silicosos, granulometria menor que 0,074 mm) retornam ao local em lavra, para preenchimento da cava.

Atualmente, observa-se a entrada no mercado de um outro produtor de areia: o produtor de brita que pode operar a úmido, com a lavagem do pó de pedra para a diminuição da fração fina. Neste caso, a areia resultante, denominada areia de brita, apresenta baixa quantidade de material pulverulento, e é comercializada até a fração 4,8 mm.

Na construção civil, o principal uso da areia é como agregado para concreto, argamassa, filtros, abrasivos, bases de pavimentos de concreto e asfalto, dentre outros. Segundo FRANCESCONI (1995), o principal consumidor de areia no Estado de São Paulo é o pequeno construtor, que significa cerca de 80 % do consumo total, ficando o empreiteiro em segundo lugar. O outro segmento que mais utiliza areia é a pavimentação de ruas e rodovias.

3.3. DADOS DE RESERVA, PRODUÇÃO E CONSUMO

Os dados apresentados nas tabelas deste sub-item são aqueles encontrados no Anuário Mineral Brasileiro (DNPM 1996 e 1997), Sumário Mineral (DNPM 2000), e fornecidos pelas instituições representantes do setor (ANEPAC e SINDIPEDRAS). As figuras refletem graficamente alguns dos dados indicados nas tabelas e auxiliam a visualização da importância das reservas atuais e produção de brita e areia da RMSP.

3.3.1 Reserva

As reservas minerais são obtidas através de cálculos e estimativas feitas a partir das informações fornecidas pelas minerações ao DNPM, através do Relatório Anual de Lavra, e são exigidos apenas nos casos onde há exploração através da Concessão de Lavra. As pedreiras, em geral, valem-se desta forma legal, mas podem também, como é o caso da maioria das minerações de areia, lavar apenas sob Licenciamento, e são isentas de apresentar dados de reserva. Isto faz com que os valores oficiais de reserva para as minerações de brita sejam próximos dos reais, sendo que ainda sofrem um ajuste a partir de estimativas. Para o setor de areia, os valores de reserva são muito distantes dos reais, e não há melhores dados oficiais disponíveis atualmente.

A análise dos valores de reserva permite verificar para onde caminham as atuais pesquisas minerais de apoio ao setor de pedras britadas, uma vez que estes dados caracterizam depósitos minerais potencialmente exploráveis em circunstâncias estratégicas interessantes (**TABELA 3.2 e FIGURAS 3.2 e 3.3**).

TABELA 3.2 – Dados de Reserva de Brita

	MEDIDA (1.000 m ³)		INDICADA + INFERIDA (1.000 m ³)	
	1996	1997	1996	1997
BRASIL	3.878.417	4.422.329	2.495.609	2.868.653
SÃO PAULO	1.191.906	1.299.470	1.038.684	1.181.305
RMSP	885.523	949.146	724.245	692.014
Municípios RMSP	-	-	-	-
Arujá	6.995	6.479	-	-
Barueri	213.895	205.059	120.232	106.091
Caieiras	-	11.480	-	-
Cajamar	8.400	37.641	-	1.200
Embu	22.339	46.968	6.931	18.326
Guarulhos	86.032	52.167	184.178	164.665
Itapeceira da Serra	97.486	97.037	21.811	21.806
Mairiporã	8.611	8.102	36.700	73.400
Mogi das Cruzes	115.430	126.276	89.440	-
Santa Isabel	66.931	82.437	126.891	171.067
Santana do Parnaíba	92.842	100.216	85.876	85.877
São Paulo	166.557	175.278	52.184	49.581

Fonte: DNPM (1996 e 1997)

FIGURA 3.2 – Reservas minerais medidas de brita (DNPM 1996 e 1997)

Observando estes dados, verifica-se que a RMSP é onde se localiza mais de 73 % da reserva atual do Estado de São Paulo. Em relação aos municípios, nota-se que aqueles com maiores reservas, superiores a 100 milhões de m³ de brita, são Barueri, São Paulo e Mogi das Cruzes, os quais abrigam 15 pedreiras das 39 da RMSP. Nestas áreas há ocorrência de grandes maciços graníticos, além delas se situarem a menores distâncias entre mineração / consumidores, o que pode significar uma atração de investimentos nestes locais.

FIGURA 3.3 – Reservas minerais medidas de brita por municípios (DNPM 1996 e 1997)

Grande parte das reservas minerais de brita e areia se encontra atualmente esterilizada devido à ocupação urbana, que cada vez mais tende a ser um problema no abastecimento destes insumos minerais internamente à RMSP. Os dados de reserva de areia são indicados na **TABELA 3.3** apenas para efeito ilustrativo.

TABELA 3.3 – Dados de Reserva de Areia

	MEDIDA (1.000 m³)		INDICADA + INFERIDA (1.000 m³)	
	1996	1997	1996	1997
BRASIL	287.840	398.403	327.743	331.523
SÃO PAULO	175.760	277.593	182.606	169.480
RMSP	106.382	101.259	26.825	12.605
Municípios RMSP	-	-	-	-
Arujá	5.222	5.222	2.566	2.566
Barueri	9.234	15.595	1.450	7.350
Biritiba Mirim	13.012	13.012	-	-
Embu	121	121	-	-
Guarulhos	2.482	1.449	1.076	538
Itapecerica da Serra	689	670	-	-
Itaquaquecetuba	5.787	5.414	.800	-
Mogi das Cruzes	56.506	40.875	11.193	-
Santana do Parnaíba	5.532	9.856	2.724	400
São Bernardo do Campo	347	206	227	150
São Paulo	5.517	6.907	1.600	1.600
Suzano	1.927	1.927	185	-

Fonte: DNPM (1996 e 1997)

3.3.2. Produção

Também para a produção, dados oficiais não são completos por se referirem apenas a valores declarados nos Relatórios Anuais de Lavra, exigidos para o regime de Concessão de Lavra e não para os de Licenciamento. Nas **TABELAS 3.4** e **3.5**, além dos dados oficiais, encontram-se os dados fornecidos por entidades representativas do setor, resultado de estimativas baseadas em cálculos de índices técnicos. Os dados publicados referem-se ao exercício do ano anterior. As **FIGURAS 3.4** e **3.5** ilustram a atual situação nacional da produção de agregados.

Os valores apresentados de produção de brita e areia são muito mais coerentes com aqueles praticados pelas empresas, apesar dos estimados serem menores que os oficiais no caso das pedras britadas. Ressalta-se que a produção tende a crescer, de acordo com as políticas públicas, desenvolvimento urbano, dentre outros fatores sócio-econômicos no qual está inserido o setor de construção civil. A capacidade instalada das minerações da RMSP está pronta para atender a um acréscimo de demanda de até 30 %.

TABELA 3.4 – Volumes de Produção de Brita

	OFICIAL (1.000 m ³)				ESTIMADA (1.000 m ³)		
	1995	1996	1997	1998	1996	1997	1998
BRASIL	68.952 ⁽¹⁾	61.452 ⁽²⁾	88.500 ⁽³⁾	86.500 ⁽³⁾ 82.622 ⁽⁴⁾	60.500	64.000	70.000
SÃO PAULO	26.836 ⁽¹⁾	33.313 ⁽²⁾	n.p.	n.p.	33.300	32.000	35.000
RMSP	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	16.656	16.283	17.565

Fonte: oficial - 1) DNPM (1996); 2) DNPM (1997); 3) DNPM (2000); 4) MINÉRIOS & MINERALES (2000)
 estimada - 5) SINDIPEDRAS (2000)
 n.c. = não calculada / n.p. = não publicada

FIGURA 3.4 – Produção de brita no Brasil

TABELA 3.5 – Volumes de Produção de Areia

	OFICIAL (1.000 m ³)				ESTIMADA (1.000 m ³)		
	1995	1996	1997	1998	1996	1997	1998
BRASIL	53.787 ⁽¹⁾	99.474 ⁽²⁾	128.600 ⁽³⁾	125.400 ⁽³⁾ 133.261 ⁽⁴⁾	99.000 ⁽⁵⁾	n.c.	150.000 ⁽⁵⁾
SÃO PAULO	21.685 ⁽¹⁾	48.304 ⁽²⁾	n.p.	n.p.	48.300 ⁽⁵⁾	n.c.	70.000 ⁽⁵⁾
RMSP	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	36.000 ⁽⁵⁾	n.c.	20.000 ⁽⁵⁾ *

Fonte: oficial - 1) DNPM (1996); 2) DNPM (1997); 3) DNPM (2000); 4) MINÉRIOS & MINERALES (2000)
 estimada - 5) cálculo feito a partir de ANEPAC (2000) e AREIA & BRITA (2000)
 n.c. = não calculada / n.p. = não publicada; * = considerada apenas a produção na RMSP

FIGURA 3.4 – Produção de areia no Brasil

3.3.3 Consumo

O baixo índice brasileiro *per capita* de consumo de agregados (2,1 t/hab/ano), segundo DNPM (2000) evidencia a demanda reprimida existente no país, representada por agudas carências em habitação (carência de 5 milhões de moradias), saneamento básico e infra-estrutura, colapso da malha viária, paralelamente a um acelerado desenvolvimento urbano, mesmo no Estado de São Paulo, a região mais desenvolvida do país. Em tese, o consumo de agregados deveria aumentar consideravelmente no país, para suprir as obras necessárias para acompanhar o desenvolvimento nacional, que atualmente ocorre com crescimento desordenado e sem planejamento.

O Estado de São Paulo representa a maior produção e o maior consumo de agregados do Brasil, sendo a RMSP a maior região produtora e consumidora. Os valores de produção são geralmente deduzidos a partir de somatórias e estimativas realizadas a partir de dados fornecidos pelos empreendimentos, e os valores de consumo são gerados a partir das indústrias que consomem os agregados. Segundo SARAIVA JR (*apud* BIGARELLA e ALVES 1998) é difícil apurar os dados de

consumo do setor de agregados, sendo predominantemente feitas estimativas e não estatísticas. Usa-se a correlação de 1 tonelada de cimento para cada 6 toneladas de agregados. Como a produção de cimento está em torno de 40 milhões de toneladas, estima-se o consumo de 150 milhões de toneladas de agregados (90 milhões de areia e 60 milhões de brita), considerando-se a razão de brita e areia em 1:1,5. Porém, o valor divulgado em DNPM (2000) para a produção de 1999 é de cerca de 344 milhões de toneladas, indicando valores mais reais, uma vez que não se utiliza areia e brita apenas para a produção de concreto.

De acordo com as fontes consultadas, verificou-se não ser tão simples conciliar os mesmos números para a produção e consumo de agregados, utilizando-se as estimativas das entidades representantes do setor produção de agregados e dos setores de aplicação. Este trabalho optou por utilizar os dados de produção declarada pelos empreendimentos para quaisquer cálculos, uma vez que a maioria das minerações está produzindo sob demanda e evitando manter estoques.

Para o setor de pedra britada, todo o material consumido na RMSP é produzido internamente; os únicos limites de produção/consumo são de transporte, que correspondem a distâncias de comercialização (valor de frete) e pedagiamento nas rodovias. Como o setor está produzindo valores bem abaixo da sua capacidade instalada, crê-se que, em momentos de desenvolvimento do país e do estado, não ocorrerão problemas no abastecimento de brita.

Para a areia, o panorama é um pouco diferente. Estima-se que a demanda de areia na RMSP é de mais de 30 milhões m³/mês, baseado em ANEPAC (2000), e não vem sendo internamente abastecida. Atualmente, mais de 50 % da areia consumida na RMSP é produzida em distâncias superiores a 80 km (principalmente provenientes dos Vale do Paraíba e Vale do Ribeira), com o agravante advindo do tráfego gerado pela entrada e saída da RMSP de mais de 1.500 caminhões por dia apenas transportando areia. Neste caso, a alternativa para o abastecimento seria o aumento da produção da areia de brita na RMSP. Esta e outras alternativas vem sendo intensamente pesquisadas e discutidas por empresários, pesquisadores e governo, por ser um problema que atinge a todos os setores da economia.

3.4. MÉTODOS DE LAVRA E BENEFICIAMENTO

Os métodos de lavra e beneficiamento empregados na mineração de agregados da RMSP baseiam-se na descrição metodológica da publicação Mercado Produtor Mineral (IPT 1990), e foram adaptados nesta pesquisa, de acordo com a prática empregada nos empreendimentos visitados.

3.4.1 Brita

A lavra de brita é feita a céu aberto, em meia encosta (**FOTOS 3.5 a 3.7**), e as operações se iniciam com a execução do plano de fogo para desmonte primário (perfuração + detonação por explosivos - **FOTOS 3.8 a 3.10**), que fragmenta cada trecho das bancadas da frente de lavra (**FOTO 3.11**).

FOTO 3.5 – Vista da frente de lavra e bancadas (BR26)

FOTO 3.6 – Vista da frente de lavra e bancadas (BR34)

FOTO 3.7 – Vista da frente de lavra e bancadas (BR20)

FOTO 3.8 – Perfuratrizes fazendo a malha de fogo (BR21)

FOTO 3.9 – Desmonte da bancada (no momento da explosão) (BR06)

FOTO 3.10 – Desmonte da bancada (após a explosão) (BR06)

FOTO 3.11 – Material resultante de desmonte primário (BR12)

Caso o material não esteja com dimensões adequadas para a entrada na planta de beneficiamento (fragmentos maiores que 1 metro), efetua-se o desmonte secundário, por fogacho, rompedores hidráulicos ou *drop ball* (FOTO 3.12).

FOTO 3.12 – Desmonte secundário por rompedores hidráulico (BR21)

Em seguida, efetua-se o carregamento dos fragmentos rochosos com pás-carregadeiras em caminhões (**FOTO 3.13**), que depositam o material em locais junto às instalações de britagem, conhecidos como praças de alimentação (**FOTO 3.14**), para armazenagem temporária e alimentação dos britadores em horários específicos (à noite, refeições, manutenção, etc.), ou transportam o material diretamente até os britadores primários (**FOTO 3.15**).

FOTO 3.13 – Carregamento dos caminhões (BR21)

FOTO 3.14 – Formação da praça de alimentação (BR31)

FOTO 3.15 – Alimentação do britador por caminhões (BR20)

As operações de beneficiamento são puramente mecânicas, e consistem em britagem primária, secundária e rebitagem em uma ou duas etapas (britagem terciária e quaternária), e pode ser realizada a seco ou a úmido. O britador primário, de mandíbulas (**FOTOS 3.16 a 3.18**), faz a fragmentação dos matacões, e neste

ponto pode ou não ocorrer lavagem da pedra, para a diminuição de material pulverulento durante a cominuição e classificação da rocha.

FOTO 3.16 – Britador primário (BR21)

FOTO 3.17 – Britador primário (BR06)

FOTO 3.18 – Britador primário (BR20)

No caso de ocorrer lavagem, as partículas menores são estritamente produzidas nas fases seguintes, e são isentas de quaisquer impurezas anteriores, tais como capeamento, matéria orgânica, dentre outras. Quando não há lavagem, é comum a separação de bica corrida (FOTO 3.19) quando não há lavagem após a primeira britagem, onde o material é enviado para ser comercializado sem qualquer classificação.

FOTO 3.19 – Pilha de bica corrida (BR08)

Após a fragmentação no britador primário, há a formação de pilhas-pulmão (FOTO 3.20 e 3.21), que alimentam os britadores secundários. O britador secundário pode ser de mandíbulas (FOTO 3.22) ou do tipo cônico (FOTO 3.23 e FOTO 3.24).

FOTO 3.20 – Pilha pulmão (BR29)

FOTO 3.21 – Pilha pulmão (BR12)

FOTO 3.22 – Britador secundário (BR01)

FOTO 3.23 – Britador secundário (BR29)

FOTO 3.24 – Britador secundário (BR06)

Os britadores terciário e quaternário são cônicos (FOTOS 3.25 a 3.27), ou de impacto, sendo atualmente usados na tentativa de reduzir a lamelaridade do agregado e a produção de finos.

FOTO 3.25 – Britador quaternário (BR01)

FOTO 3.26 – Britadores terciário e quaternário (BR17)

FOTO 3.27 – Britadores terciário e quaternários (BR09)

O transporte de brita entre os britadores e/ou rebitadores é feito, normalmente, por um sistema de correias transportadoras (FOTO 3.28), sempre procurando aproveitar o desnível topográfico para economia na planta de beneficiamento, bem ilustrado pela FOTO 3.29. Para diminuir o pó em suspensão, gerado pela atividade de britagem, algumas das pedreiras valem-se de sistemas de aspersores de água, instalados nas bocas dos britadores (FOTO 3.30) e nas correias transportadoras (FOTO 3.31).

FOTO 3.28 – Correias transportadoras (BR06)

FOTO 3.29 – Cachoeira de pedra (BR34)

FOTO 3.30 – Aspersores de água no britador primário (BR20)

FOTO 3.31 – Aspersores de água em correias transportadoras (BR28)

A classificação por diâmetros nominais é feita em peneiras vibratórias, com telas de aço ou borracha, em *decks* ou silos (FOTOS 3.32 e 3.35).

FOTO 3.32 – Peneiras vibratórias (BR20)

FOTO 3.33 – Deck de peneiras (BR30)

FOTO 3.34 – Deck de peneiras (BR31)

FOTO 3.35 – Silos de peneiras (BR20)

Geralmente, a fração retida nas peneiras superiores retorna aos rebitadores, para produzir pedra 01, e atender à demanda atual, e a fração passante compõe as pilhas, principal forma de estoque dos produtos (FOTOS 3.36 a 3.39). A expedição é mecanizada (FOTO 3.40) ou automatizada (FOTO 3.41) e o transporte é feito exclusivamente via frete.

FOTO 3.36 – Pilha de Pedra 1, Pedra 3 e Pedrisco (BR30)

FOTO 3.57 – Pilha de pedrisco (BR09)

FOTO 3.38 – Separação dos produtos em pilhas (BR34)

FOTO 3.39 – Pilha de Pedra 01 (BR31)

FOTO 3.40 – Expedição dos produtos (BR09)

FOTO 3.41 – Expedição automatizada de Pedra 01 (BR29)

A diferença principal entre as plantas de beneficiamento das pedreiras da RMSP é notada na operação de beneficiamento, que pode ocorrer a seco ou a úmido, dando uma maior flexibilidade à produção. No primeiro caso, os produtos da classificação são estocados em pilhas ao ar livre ou em silos, e o produto de menor granulometria é o pó de pedra, podendo ser ou não um resíduo, dependendo da comercialização deste material. Nas operações a úmido, geralmente com lavagem do pedrisco e separação da areia de brita, os finos (em suspensão na água) são descartados e enviados para bacias de decantação.

Como a separação do subproduto areia de brita, neste caso, é uma das formas de produção da areia, a descrição do beneficiamento será feita no item 3.4.2.2.

3.4.2 Areia

A areia é quase sempre comercializada na forma como é extraída, passando, na maioria das vezes, apenas por grelhas fixas que separam as frações mais grossas (cascalho, pelotas, concreções) e eventuais sujeiras (matéria orgânica, folhas, troncos), e por uma simples lavagem para retirada de argila. A lavra da areia na RMSP ocorre segundo esboçado na TABELA 3.5.

TABELA 3.5 – Métodos de lavra de areia e tipos de depósitos minerais

MÉTODO DE LAVRA	DEPÓSITOS MINERAIS	SITUAÇÃO
Dragagem	Sedimentos inconsolidados quaternários	Leito de rio
		Cava submersa (Leito desviado de rio)
Desmonte Hidráulico	Planícies fluviais, coberturas e sedimentos inconsolidados quaternários	Cava seca (Leito desviado de rio)
	Rochas sedimentares cenozóicas	Cava seca
	Manto de alteração de rochas pré-cambrianas	

Nacionalmente, o panorama é de 90 % extraindo areia de leitos de rio e apenas 10 % dos casos em cava seca (**FIGURA 3.6**). No Estado de São Paulo, 45 % é proveniente de várzeas, 35 % de leito de rios e o restante das outras fontes (DNPM 2000). Segundo KIHARA (1998), na RMSP observa-se o seguinte panorama de produção de areia: 86 % em cava seca por desmonte hidráulico; 10% em cava submersa, e 4 % extração em leito de rio, estes dois últimos com método de lavra por dragagem.

Acredita-se, de acordo com dados verificados no campo e discutidos com especialistas do setor, que a quantidade de empresas lavrando por desmonte hidráulico em cava seca é maior que o valor apresentado acima, e que a dragagem em cavas submersas e leitos de rio é uma prática em crescente desuso na RMSP, o que não ocorre em outras regiões do país.

FIGURA 3.6 – Panorama das minerações de areia

3.4.2.1 Métodos de lavra de areia

O método de **cava seca** é empregado na lavra de depósitos de planície fluvial, formações sedimentares, coberturas indiferenciadas e mantos de alteração de rochas cristalinas. A extração é feita por desmonte hidráulico com a mina evoluindo para o formato de uma cava ou de um talude irregular (**FOTOS 3.42 a 3.45**). Para otimizar o desmonte hidráulico, quando possível, existe uma etapa prévia, que compreende a escarificação da frente de lavra (**FOTOS 3.46 e 3.47**). O decapeamento antecede a operação de desmonte hidráulico, e geralmente é feito com tratores de esteiras e pás-carregadeiras, dependendo da compactação do capeamento. O desmonte hidráulico consiste na desagregação da areia utilizando-se jatos d'água de alta pressão. Estes jatos incidem na base dos taludes da cava provocando desmoronamento dos sedimentos ou rochas alteradas.

FOTO 3.42 – Vista da frente de lavra (AR16)

FOTO 3.43 – Desmonte hidráulico (AR42)

FOTO 3.44 – Desmonte hidráulico (AR14)

FOTO 3.45 – Vista da frente de lavra (AR32)

FOTO 3.46 – Desmonte por escarificação (AR 14)

FOTO 3.47 – Desmonte por escarificação (AR 32)

Uma outra operação de jateamento sobre o material desmoronado promove a desagregação dos sedimentos ou rochas e forma a **polpa** (*suspensão constituída por material sólido + água*), que desce por gravidade até uma pequena bacia de acumulação (FOTOS 3.48 e 3.49). Em alguns casos, a operação de jateamento / bombeamento só ocorre uma vez, com o material seguindo diretamente para o beneficiamento / classificação.

FOTO 3.48 – Escoamento da polpa para a bacia de dragagem (AR14)

FOTO 3.49 – Bacia de dragagem (AR39)

No método de **cava submersa**, a extração é feita na base e nas paredes laterais de uma cava preenchida com água, sendo realizada por uma draga instalada sobre um barco e equipada com bombas centrífugas. Esta cava geralmente é formada pelo desvio de rios, e trabalha material inconsolidado ou com pouca coesão. Tubos acoplados às bombas servem como condutores da água necessária à escavação e como meio de transporte da polpa até os silos, servindo

também para conduzir a polpa até as câmaras das barcas que transportam a areia até as instalações de lavagem. À medida que a polpa é descarregada nas câmaras, os finos (silte e argila) nela presentes são eliminados em suspensão na água de transbordo. Quando as barcas estão com as suas câmaras cheias, são rebocadas até as margens, onde a areia é depositada no leito da cava mediante a abertura de comportas do fundo. Em seguida, a areia é novamente succionada por uma draga montada em uma estação fixa que conduz a silos de classificação / estocagem.

A **extração em leito de rio** consiste na dragagem dos sedimentos ativos existentes nos leitos dos rios, em profundidades não muito elevadas. A dragagem é feita através de bombas de sucção instaladas sobre barcas ou flutuadores. As bombas de sucção são acopladas às tubulações que efetuam o transporte da areia na forma de polpa até os silos. O processo da extração por este método é semelhante ao método de cava submersa. Este método está em desuso na RMSP devido ao elevado assoreamento e poluição dos rios, que também oneram a limpeza e seleção do material lavrado.

3.4.2.2 Beneficiamento da areia

O beneficiamento da areia para construção é um processo executado concomitantemente à lavra e constitui-se 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 sucessivas 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, não chega a se caracterizar de fato uma operação de beneficiamento. Na lavra da cava seca, a lavagem é mais intensa e feita mediante o jateamento d'água na areia armazenada nos tanques de decantação, proveniente da caixa de acumulação (**FOTOS 3.50 e 3.51**).

FOTO 3.50 – Caixa de relavagem (AR42)

FOTO 3.51 – Lavagem e escoamento (AR06)

A classificação dos produtos é iniciada por um peneiramento, com a retirada do material mais grosso (concreções / pedrisco / cascalho), em grelhas ou peneiras estáticas (FOTOS 3.52 e 3.53).

FOTO 3.52 – Peneira estática para corte do cascalho (AR42)

FOTO 3.53 – Peneira estática para corte do cascalho (AR01)

O *undersize* é separado por classe granulométrica, em caixas de classificação e armazenamento, também conhecidas como silos (FOTOS 3.54 a 3.57), com o preenchimento gradativo das caixas por decantação: da direita para a esquerda e de

baixo para cima. As primeiras recebem o material mais grosso, e, assim, sucessivamente, as caixas vão sendo preenchidas (**FOTOS 3.58 a 3.60**) até restar a fração sobrenadante (*overflow*) que é encaminhada para a bacia de decantação (**FOTOS 3.61 e 3.62**).

FOTO 3.54 – Silos de classificação (AR42)

FOTO 3.55 – Silos de classificação (AR16)

FOTO 3.56 – Silos de classificação (AR32)

FOTO 3.57 – Silos de classificação (AR16)

FOTO 3.58 – Preenchimento dos silos (AR42)

FOTO 3.59 – Preenchimento dos silos (AR39)

FOTO 3.60 – Preenchimento dos silos (AR63)

FOTO 3.61– Estravasamento do overflow (AR42)

FOTO 3.62 – Overflow indo para a bacia de decantação (AR42)

Algumas minerações estão otimizando a sua produção com a instalação de hidrociclones, para a retirada de areia com corte mais definido na fração 0,15 mm

(FOTOS 3.63 a 3.65). Os produtos finais são areia grossa, média e fina, e a sua expedição é feita diretamente nos silos, ou são estocados em pilhas (FOTOS 3.66 a 3.71). O cascalho pode também ser um subproduto nas minerações.

FOTO 3.63 – Hidrociclones (AR14)

FOTO 3.64 – Hidrociclones (AR42)

FOTO 3.65 – Hidrociclones (AR06)

FOTO 3.66 – Carregamento dos caminhões diretamente nos silos (AR39)

FOTO 3.67 – Carregamento dos caminhões diretamente nos silos (AR32)

FOTO 3.68 – Pilha de areia (AR06)

FOTO 3.69 – Pilhas de estoque (AR16)

FOTO 3.70 – Pilhas de estoque (AR14)

FOTO 3.71 – Carregamento dos caminhões nas pilhas (AR25)

A maior parte do rejeito, constituído por partículas finas de composição silto-argilosa, é um material gerado no vertedouro dos tanques de decantação e é armazenado em reservatórios (bacias de decantação / contenção de rejeitos) especialmente constituídos para este fim.

As pedreiras que produzem areia de brita fazem a lavagem do pó de pedra e/ou pedrisco, e a separação destes materiais e a areia é feita com o auxílio de alguns equipamentos, onde variam o grau de eficiência: classificadores em espiral,

rodas d'água, raspadores e hidrociclones (FOTOS 3.72 a 3.77). Os classificadores em espiral, rodas d'água e raspadores utilizam-se da gravidade para retirar a areia, mais grossa, dos finos em suspensão, porém sem nenhum corte granulométrico fixo. O hidrociclone pode dar um controle maior da granulometria deste corte, e também é utilizado para uma melhor otimização da produção da fração areia.

FOTO 3.72 – Classificador em espiral (BR09/AR61)

FOTO 3.73 – Roda d'água (BR16/AR66)

FOTOS 3.74 e 3.75 – Tanque com "raspador" instalado (vista superior e inferior) – (BR07/AR60)

FOTO 3.76 – Hidrociclones (BR09/AR51)

FOTO 3.77 – Classificador em espiral (BR31/AR64)

CAPÍTULO 4 - RESÍDUOS DA MINERAÇÃO DE AGREGADOS

4. RESÍDUOS DA MINERAÇÃO DE AGREGADOS

A princípio, os resíduos considerados nesta pesquisa compreendiam todo material que atualmente não tem aproveitamento econômico, com suas especificações variando de acordo com o bem mineral produzido, tipo de depósito mineral / método de lavra, e porte da mineração. Entretanto, no desenrolar da mesma, observou-se que algumas empresas produtoras de brita já operam com aproveitamento integral do material lavrado para usos menos nobres dos produtos finais do processo. Face ao que foi verificado junto às pedreiras e percepção da possibilidade de melhor aproveitamento econômico da produção, decidiu-se por incluir nesta pesquisa a fração abaixo de 4,8 mm produzida pelas minerações de brita, com beneficiamento a seco ou à úmido, que compreende tanto o material descartado como rejeito quanto aquele ora comercializado. Para as minerações de areia, o material estudado pela pesquisa é aquele resultante da classificação / peneiramento de areia no circuito industrial, com granulometria, em geral, inferior a 0,15 mm.

4.1. MINERAÇÕES DE BRITA

Nas pedreiras, o volume de material descartado na lavra é relativamente pequeno, representado basicamente por capeamento e rochas alteradas ("moledo"), que é colocado em "botas-fora". A quantidade dos materiais originados de rochas graníticas e gnáissicas e subaproveitados pelas indústria de aplicação, que foram citados no item anterior e separados para estudo (pó de pedra e finos de pedreira), varia caso a caso. Nas pedreiras com beneficiamento a seco, a produção de pó de pedra chega, em alguns casos, a 40 % do total. Para as pedreiras com beneficiamento a úmido, a quantidade de finos descartados não passa de 10 %, com aproximadamente a mesma quantidade em produção de areia de brita.

4.1.1. Pó de Pedra

Conforme definido no capítulo anterior, o pó de pedra é um material resultante da britagem de rochas, com diâmetro menor que 4,8 mm, comercializado a seco (**FOTOS 4.1 a 4.5**). É um produto com alguma aceitação no mercado,

geralmente utilizado em sub-bases de pavimentações, na mistura em usinas de asfalto e na fabricação de blocos de concreto e pré-moldados.

FOTO 4.1 – Pilha de estoque de Pó de Pedra (BR01)

FOTO 4.2 – Pilha de pó de pedra (BR30)

FOTO 4.3 – Pilha de estoque de Pó de Pedra (BR34)

FOTO 4.4 – Pilha de pó de pedra (BR29)

FOTO 4.5 – Pilha estoque de pó de pedra (BR28)

O pó de pedra chega a ser um produto nobre em alguns empreendimentos, que utilizam este material como matéria-prima básica para a fabricação de asfalto, geralmente em empresas de mineração pertencentes a grupos concretieiros. Entretanto, de modo geral, a estocagem / armazenamento do pó de pedra é um grande problema da maioria das pedreiras, pois, as pilhas de estocagem expostas à ação dos ventos podem liberar material particulado, provocando poluição do ar, ou sob a ação das chuvas, pode ocorrer carreamento dos finos para a rede de drenagem, provocando o entupimento das tubulações e assoreamento (FUJIMURA *et al.* 1995). Estes fatores são ainda mais agravantes com a proximidade das comunidades que vem se instalando nos entornos da mineração. Segundo o autor, a porcentagem de finos gerados é da ordem de 10 a 15 %, variável em função dos equipamentos de britagem e da natureza da rocha.

CUCHIERATO & SANT'AGOSTINO (2000) estimam que a produção atual de pó de pedra é superior a 3 milhões de m³ por ano, e a porcentagem de pó de pedra produzido nas minerações chega, em casos extremos, a corresponder a 40 % da produção total de pedras britadas. Este material representa interessante alternativa para abastecimento de areia na RMSP, sendo usado como agregado miúdo.

Desta forma, o estudo do aproveitamento tecnológico deste material pode contribuir para a diminuição do material disposto em pilhas de estoque de pó de pedra e conseqüentes agravantes ao meio ambiente, fomentar o aumento da economicidade dos empreendimentos minerários e indicar alternativas para consumidores de bens minerais com estas características.

4.1.2. Areia de brita

A areia de brita é o material resultante de britagem de rochas em pedreiras onde o beneficiamento é feito a úmido, em que há lavagem nas etapas finais de classificação para a retirada de uma fração mais fina, cuja granulometria corresponde ao intervalo entre 4,8 mm e 0,074 mm (**FOTOS 4.6 a 4.8**). É um produto alternativo para o abastecimento da areia natural na RMSP, e atualmente, a areia de brita já está disponível em algumas pedreiras, sendo que a produção destes materiais encontra-se limitada à participação como subproduto da brita. A areia de brita apresenta um grau mais baixo de maturidade mineralógica que as areias naturais, com presença de quartzo e feldspato, e dependendo da rocha-fonte, de

micas, piroxênios e anfibólios, e minerais de ferro/titânio, com baixa quantidade de argilominerais. As características da areia de brita, tais como mineralogia, composição química, granulometria, resistência mecânica, arredondamento, esfericidade e níveis de impureza, são fatores determinantes para sua possível aceitação no mercado.

FOTO 4.6 – Areia de brita (BR16)

FOTO 4.7 – Areia de brita (BR16)

FOTO 4.8 – Areia de brita (BR07)

A aplicação desta areia em concretos é tecnicamente viável e algumas vezes implica em um pequeno aumento de custo, devido a eventual necessidade da adição de cimento na massa, uma vez que sua curva granulométrica, superfície específica e

outras propriedades diferem das areias tradicionais (SOARES *et al* 1996, SOARES & MENDES 1999 e MENDES 1999). As concreteiras, tendo como produto a tecnologia do concreto, conseguem bom aproveitamento do material, podendo garantir ao mesmo tempo baixo consumo de cimento, boa qualidade e trabalhabilidade do concreto (TERRA 2000). Já as construtoras que misturam o concreto no canteiro da obra, geralmente optam pela areia de rio, ainda que, na maioria das vezes, com custos mais elevados (CPRM 1997).

A areia de brita só não tem maior comercialização devido a questões de tradição e desconhecimento de suas características tecnológicas por parte dos consumidores. Este trabalho pretende contribuir para a disponibilidade de informações tecnológicas a respeito deste material, de forma a possibilitar um acréscimo na sua utilização.

4.1.3. Finos de pedreira

Os finos de pedreira são caracterizados por serem um material de granulometria abaixo de 0,074 mm, em suspensão na água (FOTOS 4.9 a 4.11). A produção dos finos, limitada a deslamagem da areia na produção de brita com processo de beneficiamento a úmido, apesar de não ser tão significativa em termos quantitativos, é um grande problema ambiental, quanto à sua disposição. Trata-se de um material gerado como uma polpa muito diluída que é disposta em bacias de decantação ou lagoas de captação (que abastecem o beneficiamento), o que faz com que o assoreamento destes corpos d'água seja um agravante anti-econômico ao processo produtivo.

A potencial utilização deste material pode incentivar a alteração das plantas de beneficiamento das minerações, uma vez que a disposição desta fração é o principal entrave para seu uso. Neste trabalho, foram contemplados ensaios de caracterização tecnológica que forneceram informações interessantes, apresentados e discutidos mais adiante.

FOTO 4.9 – Bacia de decantação dos finos (BR09)

FOTO 4.10 – Bacia de decantação dos finos (BR01)

FOTO 4.11 – Bacia de decantação dos finos (BR16)

4.2. MINERAÇÕES DE AREIA

As minerações de areia são responsáveis pelo movimento de grande quantidade de material, parcialmente destinado ao aproveitamento da fração arenosa. Uma parcela considerável do material extraído, cerca de 30 a 50 % da produção total (em peso), é constituído de resíduos finos (silto-argilosos), os quais são depositados em bacias de sedimentação, quando não são descartados diretamente na rede de drenagem (**FOTOS 4.12 a 4.17**). A possibilidade do aproveitamento de resíduos gerados nos processos de lavagem, ou deslamagem, para fins de cerâmica vermelha (estrutural/revestimento), branca ou refratária proporcionaria a minimização de impactos ambientais com provável aumento na rentabilidade dos empreendimentos mineiros.

FOTO 4.12 – Bacia de decantação dos resíduos finos (AR16)

FOTO 4.13 – Bacia de decantação dos resíduos finos (AR42 Global)

FOTO 4.14 – Bacia de decantação dos resíduos finos (AR25)

FOTO 4.15 – Bacia de decantação dos resíduos finos (AR08)

FOTO 4.16 – Bacia de decantação dos resíduos finos (AR42 Cida)

FOTO 4.17 – Bacia de decantação dos resíduos finos (AR06)

O material resultante da lavra em cava seca é igualmente fino, composto por areia fina, silte e argila, e é sedimentado e adensado em bacias de sedimentação. Algumas destas bacias de sedimentação, já preenchidas e compactadas, chegam a formar um novo depósito mineral, com facilidades de extração, constituídos destas frações granulométricas em proporções variáveis.

Em portos de areia com extração em leito de rio, o panorama é um pouco diferente. Apesar de não existirem dados precisos, estima-se que o aproveitamento da areia é de cerca de 70 a 80 % (em peso) do material extraído, e os resíduos deste tipo de empreendimento são basicamente silicosos, sendo potencialmente aplicáveis na indústria cerâmica ou na construção civil. Muitos portos de areia utilizam este material para preencher lagos e depressões deixadas pelo processo extrativo, o que pode diminuir o interesse deste setor na busca de usos alternativos para seus resíduos.

De qualquer forma, procurou-se verificar a aplicação destes materiais no segmento cerâmico e vidreiro, a partir dos ensaios de caracterização tecnológica realizados com as frações descartadas.

4.3. UTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

Nos últimos anos, vem crescendo a preocupação com a maximização do aproveitamento dos recursos naturais, com redução de custos (lucros) e otimização da produção, com o problema na disposição de resíduos (áreas) e com a preservação do meio ambiente. A legislação ambiental vigente estabelece uma série de procedimentos necessários para a disposição de resíduos. Com o aumento do grau de exigência de medidas de proteção ambiental aumentaram os custos para os produtores e consumidores dos bens minerais. Quando se busca alternativas para mitigar o acréscimo no custo, geralmente chega-se aos estudos de reciclagem e reutilização de resíduos.

Existem vários trabalhos realizados no sentido da verificação do potencial aproveitamento de resíduos gerados pelos processos produtivos, em especial do setor da mineração de agregados. JOHN (1996), aborda a pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos e expõe que a pesquisa acadêmica de novos materiais de construção civil geralmente possui uma estratégia que desenvolve a pesquisa com pouca ou nenhuma integração efetiva com as empresas

produtoras de resíduo e potenciais usuários, e, com raras exceções, não chegam a ser utilizadas, causando um impacto nulo para o meio ambiente e políticas econômicas e sociais.

A partir dos resultados deste trabalho, foi possível a definição de algumas diretrizes sobre o potencial de substituição de matérias-primas tradicionais em alguns segmentos do setor industrial consumidor, uma vez que os ensaios de caracterização tecnológica nos resíduos foram testados comparativamente com materiais disponíveis no mercado. Com o desenvolvimento da pesquisa, ficou evidente que este assunto está longe de ser esgotado, ficando aqui apenas uma contribuição inicial em alguns aspectos, bem como o levantamento de setores a serem melhor estudados.

4.3.1. Estudos anteriores

Diversos autores já trabalharam com alguns dos materiais enfocados nesta pesquisa, com resultados interessantes e positivos de sua utilização. Abaixo são apresentados os principais tópicos abordados por cada um deles, separados de acordo com o segmento de aplicação em que foram estudados, sendo que alguns dos trabalhos não tiveram caráter de aplicação, mas de tecnologia. É interessante notar que a aplicação destes materiais teve e tem grande interesse no setor da construção civil, e alguns trabalhos pioneiros e indicativos na área cerâmica e da indústria vidreira.

4.3.1.1. Indústria cerâmica e vidreira

O IPT (1987) realizou uma série de ensaios de caracterização tecnológica e beneficiamento com os finos de cinco pedreiras da RMSP, visando o aproveitamento de sílica e feldspato na indústria vidreira, em que foram obtidos resultados favoráveis, e foi verificada qual a melhor forma de separar os minerais úteis da lama (argilominerais e outros).

CHAVES & PAUL (1992) estudaram os finos de pedreira de calcário em Illinois, USA, com aglomeração de pelotas de 12,5 mm, capazes de resistir ao manuseio a ao transporte por caminhões, sem desprendimento de poeira. Desta forma, estudaram uma saída para a armazenagem de finos (que chegam a 15 %),

de outra forma que não as tradicionais bacias de contenção de rejeitos e pilhas de estoque, junto às pedreiras e dentro de áreas metropolitanas.

A pelotização é conseguida mediante a adição adequada de partículas finas e água em um meio revolvente. É um processo de aglomeração de finos abaixo de 0,150 mm (#100), que utiliza água e ligantes orgânicos e/ou inorgânicos. Em IWAKAWA & CHAVES (1993) houve uma continuidade do estudo anterior, em que pesquisaram o uso dos finos de areia em vidraria, usando como aglomerantes os próprios fundentes utilizados para a fabricação de vidro.

SANT'AGOSTINO & KAHN (1998) não estudaram resíduos propriamente ditos, mas matérias-primas alternativas para a indústria do vidro, cujas composições química / mineralógica podem se assemelhar aos resíduos de alguns tipos de depósitos minerais encontrados na RMSP. No trabalho em questão, pesquisou-se rochas granitóides com textura porfírica, e os autores apresentaram a metodologia para a caracterização tecnológica deste material.

CUCHIERATO *et al.* (1998) apresentam os resultados de estudos iniciados em IPT (1996b), onem que foram realizados ensaios cerâmicos com resíduos de mineração de areia de um depósito do tipo manto de alteração, localizado em Parelheiros, município de São Paulo. Os resultados deste trabalho sugerem que os resíduos podem ser aproveitados no setor da indústria cerâmica, tanto em cerâmica vermelha, como em ramos mais nobres, de cerâmica branca e refratária.

Rochas graníticas parcialmente alteradas, ricas em feldspato, estão sendo uma fonte alternativa para as indústrias de vidros, cerâmica e fritas. A empresa CÉRAMUS (1998) comercializa o produto denominado areia feldspática, um material que apresenta de 55 a 75 % de feldspato. Este produto já tem grande aceitação no mercado, sugerindo a possibilidade de inserção de outras alternativas para as indústrias consumidoras.

ALVES & BALDO (1998) apresentam um estudo feito sobre o potencial do uso de resíduos argilosos da mineração de areia industrial na fabricação de cerâmica de revestimento. Seus resultados indicam a viabilidade de uso destes resíduos na composição das massas cerâmicas, como emagrecedores de argilas extremamente plásticas na indústria de tijolos e telhas (cerâmica estrutural).

SAITO & SANT'AGOSTINO (1999) avaliaram o aproveitamento do manto de intemperismo de rochas granitóides porfíricas, com matriz friável favorecendo a

concentração de feldspatos potássicos. Este material foi caracterizado como areia feldspática, e quando submetidos a ensaios de aplicação, geraram resultados interessantes para vidros de embalagens e massas cerâmicas tradicionais.

A diminuição relativa da disponibilidade e a potencial substituição de fundentes tradicionais motivou MOTTA (2000) a desenvolver uma pesquisa com a seleção de três estudos de caso, testando a possibilidade de obtenção de matérias-primas fundentes a partir de fontes inéditas. Os materiais estudados eram rochas metamórficas quartzo-feldspáticas, com as quais realizou testes de beneficiamento e ensaios de aplicação da rocha total em massas cerâmicas.

4.3.1.2. Indústria da construção civil e pavimentação

PRISZKULNIK *et al.* (1972) estudaram as características físico-mecânicas e químicas dos agregados que afetam a resistência e durabilidade do concreto e argamassas, e verificaram a influência da substituição da areia detrítica pela areia resultante da cominuição de rochas, segundo sua distribuição granulométrica e ensaios tecnológicos comparativos.

SBRIGHI NETO (1975) estudou a influência da natureza petrográfica da areia britada e seus finos em algumas propriedades do concreto, e verificou, além do comportamento de pós originados por vários tipos de rocha, que existe um valor ótimo na quantidade de finos presentes no traço, variando entre 5 e 7 %, e que as propriedades que são mais influenciadas são a trabalhabilidade e a resistência à compressão. O excesso de pó de pedra, dentre outros fatores, é um dos responsáveis pelas fissuras por contração em concretos, e a retirada completa da fração fina é prejudicial à trabalhabilidade do concreto.

Pesquisando a substituição da areia convencional pela areia granítica na produção do concreto, SBRIGHI NETO (1984) verificou que quando o agregado miúdo é constituído por areia artificial, a forma mais angulosa dos grãos, a textura superficial quase sempre mais áspera, o estado de alteração da rocha fonte e a porcentagem maior de elementos finos produzem um concreto onde a mistura é “menos trabalhável”. Grande parte destas particularidades do material são produto da natureza petrográfica da areia britada, que acaba, por si só, exercendo influência na trabalhabilidade. Para reduzir consideravelmente estes problemas, este autor sugeriu o simples controle de porcentagem dos elementos finos, elaboração de

dosagem ideal, e ainda utilização do tipo adequado de britador (de preferência, de martelos, para gerar fragmentos equidimensionais). Concluiu, ainda, que o volume produzido de areia britada pode suprir parcela significativa do mercado consumidor de agregados para concretos.

SBRIGHI NETO (1986) confirma que a substituição de areia natural por areia de brita é perfeitamente viável desde que haja um controle dos materiais a serem utilizados em traços tradicionais de concreto, e que os resultados dos ensaios de resistência à compressão, permeabilidade, capilaridade e desgaste foram deram valores aceitáveis para a areia britada de rocha granítica.

SBRIGHI NETO & TANGO (1987) pesquisaram o uso de areia artificial de rejeito da mineração de serpentinito em concreto, e os resultados foram insatisfatórios, com desvantagem no uso deste material na relação consumo de cimento / resistência.

Os limites para a quantidade de finos abaixo de 0,074 mm no traço do concreto, segundo KREMPEL *et al.* (1992), estão entre 3 % se forem concretos sujeitos a abrasão / desgaste superficial, 5 % para demais concretos, e se a rocha estiver relativamente livre de argilominerais estes limites podem estar entre 5 e 7 %. Os autores acreditam também que a utilização do rejeito da britagem na produção de concreto representam um incremento de produção e permite uma redução significativa no consumo de cimento em concretos

O uso do concreto pobre rolado na construção do anel viário da RMSP propiciou o desenvolvimento de estudos visando a substituição de areia natural por finos de pedreiras (FUJIMURA *et al.* 1995), que definiram as propriedades tecnológicas, dosagens adequadas e a trabalhabilidade, estabelecendo custos comparativos do emprego do concreto pobre rolado em relação a outros métodos de construção de pavimento e piso acabado. Seus estudos em pedreiras de rochas graníticas e gnáissicas, verificaram que 5 a 10 % do total de areia britada são finos de pedreira, e apresentam formas cúbicas, superfícies rugosas e angularidades proeminentes, com constituição mineralógica que inclui o quartzo, feldspato e micas com feições de intercrescimento. De acordo com os resultados desta pesquisa, os finos de pedreira substituem satisfatoriamente a areia natural, com melhoria na textura do concreto e economia na quantidade de brita, podendo ser empregados nas diversas camadas da pavimentação asfáltica. A SABESP vem utilizando o

concreto pobre rolado para repavimentar as vias asfaltadas após receberem tubulações de água e esgoto.

Em estudos de FUJIMURA *et al.* (1996), observou-se a influência e importância do acréscimo dos finos na massa do concreto, com a diminuição do cimento, que têm as funções de “envelopar” os grãos dos agregados de forma, preenchendo os espaços vazios e conseqüentemente, diminuindo a densidade a seco, adequando a curva granulométrica da mistura. Notou-se, também, a diminuição da trabalhabilidade em concretos com areia britada devido a ausência dos finos.

SOARES *et al.* (1996) apresenta algumas das considerações acerca da substituição da areia natural por areia de brita e pó de pedra em Concreto Pavimentado com Rolo, e os resultados não foram satisfatórios quando utilizando areia de brita totalmente limpa e lavada, com ausência de finos. O uso de pó de pedra em substituição à areia de brita melhorou a textura do concreto e mais ainda com a diminuição da pedra 2 na proporção do traço.

A substituição de areia natural por areia britada na produção de concreto a base de Cimento Portland torna-se interessante e economicamente viável quando há controle da quantidade de finos e adequada mistura da matéria-prima. SBRIGHI NETO & SOARES (1996) verificaram a influência dos finos na seguintes propriedades: resistência a compressão, trabalhabilidade, permeabilidade, capilaridade e abrasividade, e consideram perfeitamente possível o aproveitamento e utilização de cerca de 500.000 m³ de areia de brita produzidas anualmente na RMSP.

MENDES (1997) apresentou em sua pesquisa uma das etapas da caracterização tecnológica dos finos de pedreiras de basalto por análise da morfologia de partículas através do MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura), objetivando sua utilização em concreto pavimentado a rolo. As imagens obtidas no MEV permitem uma visualização abrangente da morfologia das partículas.

PITTA & MARCIANO JR. (1999) indicam a possibilidade de utilizar os finos de pedreira em pavimentação de concreto, com substituição parcial ou total da areia natural.

A NOVADUTRA, empresa concessionária da Rodovia Presidente Dutra, está utilizando o concreto compactado a rolo (CCR) para fazer a nova via de acesso da

Marginal Tietê ao Aeroporto Internacional de Cumbica (NOVADUTRA 1999), com uso de pó de pedra. ABCP (2000) informa que o pó de pedra também vem sendo empregado como agregado miúdo em CCR, nas obras das marginais da Rodovia Pres. Castello Branco e na SP 79, em Sorocaba.

MENDES (1999) caracterizou tecnologicamente os finos de pedreira de basaltos da região de Borborema (SP), para uso em concreto compactado a rolo, na substituição de areias naturais no agregado miúdo. Este material apresenta cerca de 16 % abaixo de 0,074 mm, e os resultados para substituição em traços de CCR foram tecnológica e economicamente positivos. Utilizando critérios do DNER, foram realizados ensaios com os resíduos, confeccionando algumas dosagens experimentais de água, agregados, cimento e finos, a partir de dosagens padronizadas, para concreto compactado a rolo.

A produção do pó de pedra na RMSP é qualificada e quantificada em CUCHIERATO & SANT'AGOSTINO (2000), que verificam que este material varia de 10 a 42 % do total produzido em pedras britadas, e estimam que represente 3 milhões de m³/ano.

TERRA (2000) apresenta as vantagens do uso de britadores de impacto para a produção de areia de brita, com a lavagem do pedrisco. Este material possui apenas 6 % abaixo de 0,074 mm, e seu emprego em concreto estrutural tem apresentado resultados interessantes. Nesta mesma linha de pesquisa, GONÇALVEZ *et al.* (2000) mostram as relações de forma e granulometria entre as frações produzidas em britadores cônicos e de impacto, com ganhos para o segundo tipo, e de que forma este equipamento otimiza a produção de areia de brita com conseqüente redução dos problemas ambientais de estoque e disposição das frações mais finas.

ZANCHETA & SOARES (2000) estão estudando a substituição de areias naturais por areias de brita na produção de argamassa, onde estão sendo realizados ensaios de compressão simples em períodos de 7, 28 e 90 dias.

CAPÍTULO 5 - METODOLOGIA

5. METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido por integração das etapas descritas a seguir, em cada uma delas dependia e interferia em todas as partes. Resumidamente, as atividades envolvidas no estudo dos resíduos gerados na mineração de agregados da RMSP foram:

- a) Análise bibliográfica e compilação das informações; *(Item 5.1)*
- b) Levantamento das minerações em atividade na RMSP; *(Item 5.2)*
- c) Trabalhos de campo; *(Item 5.3)*
- d) Caracterização Tecnológica; e *(Item 5.4)*
- e) Apresentação e Análise dos resultados. *(Item 5.5)*

Devido ao caráter amplo e abrangente, e à dimensão que tomou durante o seu desenvolvimento, a pesquisa contou com a participação de diversos colaboradores, em várias etapas, incluindo orientação, discussão com especialistas e prestação de serviços técnicos especializados, e tais atuações são indicadas na TABELA 5.1. O projeto de pesquisa recebeu suporte da FAPESP na forma de Auxílio à Pesquisa (Processo 98/02917-7), Bolsa de Mestrado (Processo 98/00798-0) e Iniciação Científica, e do CNPq, com Bolsa de Iniciação Científica.

TABELA 5.1 - Atividades desenvolvidas e equipe de trabalho

ATIVIDADES		Mestranda	Estagiários	Orientadora	Técnicos	Especialistas	Laboratórios
Análise bibliográfica		E	P	P	-	-	-
Levantamento das minerações		E	C	P	-	C	-
Trabalhos de campo		E	E	O / P	-	-	-
Caracterização Tecnológica	Amostragem	E / O	E	O	E	-	-
	Preparação de Amostras	E	E	O	E	-	-
	Análise Textural	P	E	O	-	-	-
	Microscopia Óptica	P	E	O	-	-	-
	Ensaio granulométricos	E / P	E	O	E	-	-
	Análise visual	E	-	O	P	-	-
	Análises instrumentais	P	-	O	-	-	E
	Ensaio tecnológicos específicos	P	-	O	-	E	E
Apresentação e Análise dos Resultados		E	-	O / P	-	C	-

E = execução; O = orientação; P = participação; C = colaboração

5.1. ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA E COMPILAÇÃO DAS INFORMAÇÕES

A pesquisa bibliográfica foi direcionada aos temas geológico, tecnológico e mineração, e a coleta de dados e informações foi feita de forma abrangente, consultando bases de dados e profissionais em Universidades (**USP** - Instituto de Geociências e Escola Politécnica - **UNICAMP**, **UNESP**), Instituições de Pesquisa (**IPT** - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo e **IG** - Instituto Geológico), Órgãos Públicos (Prefeituras, Secretarias Estadual e Municipal do Meio Ambiente, CETESB, DNPM), Instituições Setoriais (**ANEPAC** - Associação Nacional dos Produtores de Agregados para a Construção Civil, **SINDIPEDRAS** – Sindicato da Indústria de Mineração da Pedra Britada do Estado de São Paulo, **SINDAREIA** – Sindicato da Indústria de Extração de Areia do Estado de São Paulo, **ABCP** – Associação Brasileira de Cimento Portland, **IBRAM** – Instituto Brasileiro de Mineração, **SINDUSCON** – Sindicato da Indústria da Construção Civil, **IBRACON** – Instituto Brasileiro de Concreto, **ABESC** – Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem, dentre outras), bancos de dados disponíveis na rede mundial de informática (INTERNET), e empresas do setor (mineração e indústrias de aplicação - Construção Civil, Cerâmica e do Vidro).

A pesquisa foi atualizada e revisada durante todo o desenvolvimento do projeto, e permitiu definir a situação da problemática regional do setor de agregados, bem como o atual contexto de geração de resíduos nos empreendimentos minerários, e o grau de conhecimento disponível sobre o tema do projeto. Foram também compilados dados sobre as especificações dos setores de aplicação a partir dos tipos de materiais esperados nos resíduos, dentre os setores visados.

Como resultado da análise preliminar dos dados e a síntese das informações obtidas, foram feitos:

- * seleção dos empreendimentos para estudo de caso;
- * planejamento da etapa de campo;
- * elaboração de mapas temáticos (mapas de localização das minerações e de áreas potencialmente produtoras de agregados);
- * planejamento da amostragem; e
- * planejamento dos ensaios a serem realizados (caracterização geral e tecnológicos específicos).

5.2. LEVANTAMENTO DAS MINERAÇÕES ATIVAS NA RMSP

Em toda a história da mineração de agregados na RMSP variou muito o número de empreendimentos. Para esta pesquisa, serão destacadas apenas as minerações em atividade durante o período estudado (1998-2000).

No setor de Brita existem atualmente **39 minerações ativas**, compiladas a partir de dados do IPT (1998), MINÉRIOS & MINERALES (1998 e 1999) e SINDIPEDRAS (1999). Nos levantamentos, verificou-se que as informações sobre as minerações de brita, procedentes de várias fontes, eram coerentes e suficientes para estabelecimento de um panorama geral e seleção dos estudos de caso com base nos critérios mencionados anteriormente.

Para o setor de Areia, verificou-se um conflito entre as informações disponíveis quanto às minerações ativas: CPRM (1978) cadastra 106 portos ativos; EMPLASA (1988) apresenta 55 portos ativos; BAUERMEISTER *et al.* (1997) indica 62 portos na RMSP; CPRM (1997) ilustra 67 portos. Publicações oficiais a partir de dados do DNPM (Anuário Mineral Brasileiro 1996 e 1997), publicados em MINÉRIOS & MINERALES (1998) e MINÉRIOS & MINERALES (1999) de minerações de areia que produzem quantidades acima de 10.000 m³/mês, apontam, respectivamente, apenas 35 e 33 portos ativos. MINÉRIOS & MINERALES (2000) não apresentou alterações deste quadro, sendo mantido o número de 33 portos ativos no ano de 1999.

A partir destas fontes, foi feita a compilação juntamente com informações de ajuste do SINDAREIA (1999), resultando em **66 minerações ativas**, considerando inclusive a produção de areia em minerações de brita, como subproduto. Estes dados foram ainda atualizados e conferidos com informações obtidas junto a entidades representativas, empresas e profissionais do setor de produção e aplicação, e na etapa de campo.

Devido à carência de informações precisas e atuais sobre localização e dados de empreendimentos em atividade, uma prévia consolidação e cadastramento de informações obtidas nas diversas fontes foi ferramenta fundamental para o projeto e para a seleção das minerações de areia a serem estudadas. Este foi o principal fator para a desigualdade de tratamento dado ao estudo dos resíduos produzidos nas minerações de brita e areia, com maior detalhamento das primeiras.

5.2.1. Seleção das minerações para estudo de caso

Para a seleção das empresas de mineração a serem estudadas estabeleceram-se alguns critérios, descritos na **TABELA 5.2**.

TABELA 5.2 - Critérios de seleção de minerações para estudo de caso

CRITÉRIO	DESCRIÇÃO
Localização	Realizou-se uma análise de qual a melhor representatividade do estudo dentro da Região Metropolitana de São Paulo, de acordo com a localização dos empreendimentos. Procurou-se a abrangência geográfica de toda a RMSP.
Geologia	Foram separadas as minerações que extraem pedra britada de granitos e/ou gnaisses, excluindo-se do universo de trabalho as minerações de brita a partir de calcário (03 empreendimentos que correspondem a menos de 10 % do total das empresas da RMSP). Para as areias não foi considerada a geologia da rocha-fonte como um critério para a seleção de estudos de caso.
Características das Minerações • Beneficiamento • Tipo de Depósito • Método de Lavra	A seleção das empresas de mineração de brita variou de acordo com o tipo de beneficiamento, se a úmido ou a seco. A seleção das empresas de mineração de areia variou de acordo com o tipo de depósito mineral, bem como no método de lavra. Preferiu-se estudar os casos de cava seca, que lavram areia a partir de rochas sedimentares ou mantos de alteração de rochas cristalinas, devido a sua representatividade no setor. Optou-se por não escolher os portos de areia com extração a partir de dragagem de corpos d'água (extração em leito de rio e/ou cava submersa), cuja produção de resíduos é quase inexistente, e quando existe, retorna à cava para preenchê-la. Estes casos representam apenas 14 % do total das empresas da RMSP.
Tipo do empreendimento minerário	De acordo com a organização do empreendimento minerário, segundo SARAIVA JR (<i>apud</i> BIGARELLA & ALVES 1998), existem três tipos de empresas de mineração no setor de agregados, com diferente grau de inovação e instalação tecnológica / ambiental implementados nas minerações, e subdivididas em: A) Empresas totalmente profissionalizadas, controladas por grupos multinacionais (tais como Saint Gobain, Lafarge, Holderbank); B) Empresas com estrutura familiar, mas que têm procurado elevar o nível de sua profissionalização (com instrumentos de gestão administrativa, técnica e política); e C) Empresas estagnadas no modelo familiar paternalista. Com base nestas definições, adotou-se como um dos critérios de seleção o tipo e porte das empresas, que conseqüentemente indicam a sua proximidade ou filiação aos Sindicatos Patronais (SINDIPEDRAS, SINDAREIA), o que facilitou e otimizou o acesso aos empreendimentos.
Interesse	Um dos principais critérios de seleção de minerações foi o interesse na implementação dos resultados finais desta pesquisa, bem como na facilidade de acesso às instalações e no apoio logístico da empresa na execução da amostragem. As empresas interessadas têm a preocupação com o passivo ambiental que o resíduo se tornou, e investem em tecnologia, melhorias e inovação dos seus produtos e na planta de beneficiamento, para sua otimização, dentre outras medidas. Dentre as não interessadas, estão aquelas que conseguiram uma colocação deste material no mercado ou com consumidores alternativos. Se encaixam, também, neste caso, aquelas que simplesmente não se motivaram a alterar a operação atual, ou dar maior apoio à pesquisa.
Características dos resíduos	As características dos resíduos produzidos pelas minerações foi um importante critério de seleção. A partir dos dados de litologia (geologia) e características da mineração (beneficiamento/método de lavra/depósito mineral), estimou-se o resíduo a ser encontrado, e foi selecionada a população de estudo (pó de pedra, areia de brita, finos de pedreira, finos da mineração de areia).

Dentre os critérios levantados acima, utilizou-se prioritariamente para as minerações de brita, aqueles relacionados às características das minerações (beneficiamento), interesse da empresa e característica dos resíduos. Para as minerações de areia, foram priorizadas as características dos resíduos, o tipo de empreendimento e as características das minerações (tipo de depósito / método de lavra).

5.3. TRABALHOS DE CAMPO

A complementação de dados necessários para o estudo dos resíduos gerados pelas minerações de agregados da RMSP foi obtida em trabalhos de campo, onde além da aquisição de informações acerca dos bens minerais e resíduos, foi efetuada amostragem para a realização de caracterização tecnológica dos materiais.

Nesta ocasião, foi aplicado um questionário para atualização das informações em cada empreendimento visitado. Este questionário buscou obter as principais informações a respeito da quantidade dos bens minerais produzidos e setores consumidores, a participação de cada fração dos bens minerais na produção total, a quantidade e o tipo de resíduos produzidos, o local de produção e disposição dos resíduos, dentre outras informações. Juntamente com o trabalho de reconhecimento dos processos de lavra e beneficiamento, foi feito um registro fotográfico, que faz parte de um relatório de visita elaborado separadamente para cada mineração.

O trabalho de campo foi dividido em duas etapas, apenas no que diz respeito à amostragem:

① **Primeira etapa:** algumas das minerações selecionadas para estudo foram amostradas instantaneamente, sendo que o material coletado serviu para a realização de ensaios básicos de caracterização (granulometria, análises químicas e mineralogia/petrografia).

② **Segunda etapa:** apenas para alguns casos selecionados foi realizada uma segunda etapa de campo para desenvolvimento de amostragem intensiva, que foi apoiada em recomendações das normas ABNT, adequadas de acordo com os materiais encontrados. O material coletado foi submetido a ensaios investigativos de caráter tecnológico e de aplicação.

Esta organização do projeto visou obter um panorama geral da qualidade e quantidade dos resíduos gerados nas minerações de agregados da RMSP, cuidando apenas do detalhamento de casos típicos, numa segunda fase.

5.4. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

A expressão *Caracterização Tecnológica*, segundo SANT'AGOSTINO & KAHN (1997), pressupõe o estudo de recursos minerais, tendo em vista as tecnologias usuais de seu processamento. Este termo vem sendo empregado no Brasil para denominar o estudo das propriedades físicas, químicas e físico-químicas de matérias-primas minerais para fins de beneficiamento ou aplicação, abrangendo o estudo das características do material e o levantamento de índices tecnológicos. Dentre as metodologias / técnicas envolvidas na caracterização tecnológica que foram utilizadas neste projeto, encontram-se:

- ✓ Amostragem; (Item 5.4.1)
- ✓ Preparação de amostras; (Item 5.4.2)
- ✓ Análise textural; (Item 5.4.3)
- ✓ Microscopia óptica; (Item 5.4.4)
- ✓ Classificação granulométrica; (Item 5.4.5)
- ✓ Análise visual; (Item 5.4.6)
- ✓ Análises instrumentais; e (Item 5.4.7)
- ✓ Ensaios tecnológicos específicos (Item 5.4.8)

A caracterização tecnológica de rejeitos depende, segundo MENDES (1999), muito mais de uma efetiva investigação das propriedades intrínsecas do material do que da realização de ensaios já normatizados, o que o levou a adotar uma metodologia semelhante às utilizadas para a caracterização de materiais finos, que não necessariamente apresentam normatizações específicas, nem a indicação de análises ou ensaios que necessariamente devam ser realizados. Em sua pesquisa, o autor trabalhou com finos de mineração de basalto no interior do estado de São Paulo.

Neste sentido, esta pesquisa procurou estabelecer alguns parâmetros para a caracterização de materiais residuais, de forma a poder comparar seus resultados

com os valores que as indústrias consumidoras de bens minerais exigem, e assim sugerir sua utilização. A caracterização tecnológica feita nos resíduos de mineração de brita e areia possibilitou a identificação destes materiais, e a realização de ensaios específicos de aplicação experimentou seu uso potencial.

5.4.1. Amostragem

O processo de amostragem consiste na retirada de quantidades moduladas de material (incrementos) de um universo que se deseja estudar, de tal forma que essa amostra seja representativa do todo, ou seja, que a amostra tenha exatamente as mesmas características que o universo (GOES *et al.* 1998). Posteriormente, a amostra primária é submetida a uma série de etapas de preparação que envolvem operações de redução de tamanho, homogeneização e quarteamento, até a obtenção da amostra final, com massa e granulometria adequadas para a realização de ensaios e/ou análises (química, instrumental, mineralógica, etc.).

A amostragem, propriamente dita, é uma sequência de etapas que envolve operações de retirada da amostra e da preparação da mesma, para obtenção de uma amostra final. O planejamento da amostragem (KAHN 2000) compreende:

- ⇒ definição dos objetivos da investigação;
- ⇒ definição da população a ser amostrada;
- ⇒ determinação dos atributos a serem determinados;
- ⇒ escolha da unidade de amostragem, método de medida e tamanho das amostras;
- ⇒ coleta de amostras, manuseio e preparação;
- ⇒ controle de qualidade e avaliação dos resultados.

De acordo com esta proposta, nesta pesquisa foi realizado o seguinte planejamento da amostragem:

a) Objetivos da amostragem: para o estudo dos resíduos da mineração de agregados, dois foram os principais objetivos: determinação das características físicas, químicas e físico-químicas gerais de todos os empreendimentos amostrados, e ensaios específicos de aplicação em apenas alguns casos.

b) População amostrada: a população escolhida neste trabalho para amostragem, conforme discutida no capítulo anterior, foi o material de granulometria menor que 4,8 mm nas minerações de brita, e o material de granulometria menor que 0,15 mm nas minerações de areia. O universo estudado foi a mineração de agregados da RMSP.

c) Atributos a serem determinados: a caracterização dos resíduos para as indústrias de aplicação almejadas se apoiou na determinação dos atributos de determinação granulométrica, composição química e composição mineralógica. Para as rochas-fonte foram feitos estudos petrográficos.

d) Quantidade de amostra: a quantidade da amostra a ser coletada para garantir representatividade é função da granulometria. Segundo o parâmetro de RICHARDS (KAHN 2000), para amostras com grande homogeneidade de composição, como é o caso dos resíduos estudados, partículas com diâmetro máximo menor que 4,8 mm precisam de uma massa de 10 a 30 kg. Para materiais de granulometria inferior a 0,074 mm, é necessário apenas 0,002 a 0,005 kg de amostra, para ser uma quantidade representativa.

Para os ensaios gerais de caracterização, nas pedreiras que operam a seco foi feita uma coleta de 30 kg. Nas pedreiras que beneficiam a úmido e nas minerações de areia a quantidade amostrada foi de 50 litros de polpa. Para os ensaios de caracterização tecnológica mais detalhados e específicos para indústria de aplicação, o total coletado de material seco (pó de pedra) foi de 80 kg e para material em polpa (finos de pedreira e produtos da deslamagem da areia) foi 100 litros de polpa.

e) Coleta de amostras: a amostragem de resíduos destinada aos ensaios de caracterização tecnológica foi baseada na norma NBR 7216 (ABNT 1987a) e adaptada para o material em questão. Esta norma norteou a metodologia de amostragem de agregados. As **FOTOS 5.1 a 5.14** ilustram a coleta realizada, que é detalhada abaixo.

Brita: Nas pedreiras que operam a seco, a coleta de material foi feita em pontos de descargas dos resíduos, preferencialmente junto às instalações de beneficiamento nas correias transportadoras que formam as pilhas de disposição de resíduos, com interrupção pontual e instantânea do fluxo por um recipiente de coleta. Nas pedreiras que beneficiam a úmido, os finos (-0,074 mm) foram amostrados nas calhas de descarga, também com interrupção pontual e instantânea do fluxo. A metodologia de amostragem para este caso foi do tipo aleatória, com a coleta de incrementos (± 10 kg nas operações a seco e ± 12 lts de polpa nas operações a úmido) sem padrão regular.

Para os ensaios de caracterização tecnológica mais detalhados e específicos a coleta foi feita por amostragem intensiva, com interrupção pontual do fluxo por um recipiente de coleta a cada hora, tendo-se formado uma amostra composta relativa a um período de 8 horas (jornada de trabalho média). O local de amostragem foi o mesmo da amostragem instantânea. Neste caso, a metodologia de amostragem foi do tipo sistemática, com incrementos similares coletados a intervalos de tempo regulares e previamente estabelecidos. A coleta foi executada por um técnico da mineração, que foi orientado quanto aos objetivos e interesses da pesquisa e quanto à metodologia a ser adotada para a coleta.

FOTO 5.1 – Local da amostragem de pó de pedra (BR30)

FOTO 5.2 – Local da amostragem de pó de pedra (BR10)

FOTO 5.3 – Local de amostragem do pó de pedra (BR17)

FOTO 5.4 – Local da amostragem de pó de pedra (BR08)

FOTO 5.5 – Local da amostragem de pó de pedra (BR31)

FOTO 5.6 – Local da amostragem de pó de pedra (BR26)

Areia: A amostragem seguiu o mesmo método das pedreiras que operam a úmido, tanto na amostragem instantânea quanto na intensiva. Foram feitas coletas com interrupção pontual e instantânea do fluxo em pontos de descarga da polpa nas bacias de decantação, por um recipiente de coleta.

FOTO 5.7 – Local da amostragem dos finos (AR25)

FOTO 5.8 – Local da amostragem dos finos (AR42c)

FOTO 5.9 – Local da amostragem dos finos (AR06)

FOTO 5.10 – Local da amostragem dos finos (AR14)

FOTO 5.11 – Local da amostragem dos finos (BR16)

FOTO 5.12 – Local da amostragem dos finos (AR42g)

FOTO 5.13 – Local da amostragem dos finos (AR01)

FOTO 5.14 – Local da amostragem dos finos (AR42g)

Rocha: Além dos resíduos, foram feitas coletas de amostras de mão das litologias de maior representatividade nas frentes de lavra das minerações de brita, para estudos petrográficos e caracterização das rochas-fonte de resíduos. Nas minerações de areia não foram coletadas amostras de rocha, devido à friabilidade do material (muitas vezes manto de alteração) e dificuldade de coleta de amostra representativa na frente de lavra.

5.4.2. Preparação de amostras

A preparação de amostras é uma etapa de extrema importância para garantir a confiabilidade e qualidade dos resultados obtidos, pois é onde as amostras coletadas em campo são reduzidas em massa e tamanho para serem encaminhadas para ensaios laboratoriais.

As amostras de resíduos de mineração foram preparadas conforme as **FIGURAS 5.1 e 5.2**, no Laboratório de Preparação de Amostras do Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental do IG-USP.

FIGURA 5.1 e 5.2 – Fluxogramas adotados para preparação de amostras de resíduos de:
 A - mineração de brita (beneficiamento a seco)
 B - mineração de areia e de brita (beneficiamento a úmido)

As amostras coletadas em campo foram abertas no laboratório e colocadas para secar ao ar livre. A homogeneização consistiu em misturar o material segregado durante o transporte entre a mineração e o laboratório, por chacoalhamento simples e quarteamento. O quarteamento utilizou o amostrador do

tipo Quarteador Jones, com abertura individual maior que 6 vezes o tamanho da maior partícula da amostra. A subdivisão utilizada para o quarteamento está ilustrada na **FIGURA 5.3**.

FIGURA 5.3 – Fluxograma adotado para quarteamento

(a caixa vermelha é o produto final da homogeneização e as caixas amarelas são arquivo)

Após a homogeneização, a alíquota obtida foi seca em estufa de laboratório, a uma temperatura de 80°C. Desta alíquota foram separadas duas frações, uma destinada aos ensaios granulométricos, e a outra à pulverização. Na alíquota para os ensaios granulométricos, foi realizado o controle do balanço de massa em relação as perdas de amostra durante a homogeneização / quarteamento e secagem.

A pulverização foi efetuada em moinho de anéis vibratórios, onde há predominância da redução por compressão e cisalhamento dos grãos, e o material resultante foi enviado para análise química de rocha total.

No material coletado por amostragem intensiva, as amostras foram preparadas de forma bastante semelhante àquelas amostradas instantaneamente. Para os resíduos de mineração de brita com beneficiamento a seco, as amostras foram secas ao ar livre, sofreram homogeneização por quarteamento com separação de duas alíquotas, uma para a realização de ensaio granulométrico, e outra para a classificação em frações de interesse aos ensaios tecnológicos específicos para os setores de aplicação enfocados. As frações escolhidas neste caso foram:

+ 2,0 mm / - 2,0 + 0,59 mm / - 0,59 + 0,074 mm / - 0,074 mm

Cada uma das frações separadas foi submetida a análise química e análise mineralógica. As amostras de resíduos de mineração de areia e de mineração de brita com beneficiamento a úmido foram homogeneizadas por mistura e chacoalhamento em recipientes adequados, e todo o material coletado foi trabalhado. Primeiramente foi feito peneiramento a úmido, com separação das mesmas frações de interesse no caso dos resíduos de mineração de brita, e em frações + 0,074 mm / - 0,074 mm, para os resíduos de mineração de areia.

5.4.3. Análise textural

A análise textural dos materiais foi efetuada sobre amostras das rochas-fonte, que puderam fornecer informações relevantes sobre a origem dos materiais residuais. A descrição das rochas foi realizada com o intuito de separar os tipos litológicos como um possível critério indicativo do potencial de utilização dos resíduos nas indústrias de aplicação, verificando a influência e relação da rocha-fonte com os resíduos finais. Estes estudos foram realizados no Laboratório de Preparação de Amostras do Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental do IG-USP.

As amostras de rocha foram descritas macroscopicamente para caracterização de vários aspectos, tais como: cor (presença / ausência de minerais máficos), granulação, estruturas, texturas, mineralogia dos grãos essenciais e classificação litológica da rocha. A descrição baseou-se na norma NBR 7389 (ABNT 1992), denominada *Apreciação petrográfica de materiais naturais, para utilização como agregado em concreto*.

5.4.4. Microscopia óptica

A microscopia óptica é um dos recursos mais básicos e tradicionais para se caracterizar um material. Para as descrições microscópicas das rochas-fonte foram confeccionadas seções delgadas das amostras de rocha coletadas, através da montagem com resina, com corte da amostra em fatia, colagem em lâmina de vidro e desbaste até atingir espessura de lâminas petrográficas (0,03mm), e recobrimento com lamínula. Estas lâminas foram caracterizadas petrograficamente baseadas na mesma norma utilizada para a análise textural, tendo sido adotada para a

denominação das rochas ígneas a terminologia pela classificação de STRECKEISEN (1976), e JULIANI *et al.* (1996) para rochas metamórficas

Foi realizada Microscopia de Polarização por Luz Transmitida, em microscópios petrográficos do Laboratório de Petrografia Óptica do Departamento de Mineralogia e Geotectônica do IG-USP, que permitiu a distinção das fases minerais por meio de características físicas e morfológicas (cor, transparência, brilho, hábito, clivagem, partição, fratura, etc...) e propriedades ópticas gerais. Acoplado ao microscópio, existe uma câmera fotográfica digital, que permitiu a realização de fotomicrografias digitais de alta resolução.

5.4.5. Classificação granulométrica

O conhecimento da distribuição granulométrica é fundamental para a definição da aplicação a ser dada ao resíduo estudado, pois seu desempenho, muitas vezes, se condiciona ao relacionamento de grãos entre si e o meio de aplicação (CARUSO & SBRIGHI 1983). É um dos principais aspectos a serem verificados, pois a observação da distribuição em massa na classificação granulométrica pode-se determinar o comportamento das frações finas e grossas no beneficiamento e a aplicação do material. Este comportamento será decorrente da textura e estrutura do material, que definem as dimensões e forma da associação das partículas; do estado de alteração dos minerais, decorrente de processos hidrotermais/metassomáticos e/ou supérgenos, bem como do estado de alteração da própria rocha-fonte; e da dureza dos minerais componentes.

Em materiais naturalmente desagregados, ou em produtos de cominuição, a verificação da distribuição do tamanho de partículas com a partição dos elementos úteis nesta distribuição é parâmetro fundamental na caracterização tecnológica de um material. O peneiramento, manual ou mecanizado, em procedimento a seco ou a úmido, é o recurso básico utilizado.

Os ensaios de classificação granulométrica foram feitos no Laboratório de Preparação de Amostras do Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental do IGc-USP, e seguiram os critérios estabelecidos pela NBR 7217 (ABNT 1987b), que visa quantificar percentualmente o material retido e o material passante em cada uma das peneiras escolhidas, permitindo o cálculo de alguns parâmetros úteis, tais

como: módulo de finura, diâmetro máximo, coeficiente de uniformidade, dentre outros.

A escolha da abertura das peneiras foi feita com base em algumas especificações de materiais industriais (cerâmicas, vidros e pavimentos de concreto), de forma a poder verificar a concentração nas frações de interesse nas indústrias de aplicação. Foram escolhidos os intervalos apresentados na **TABELA 5.3**.

TABELA 5.3 – Peneiras utilizadas no ensaio de caracterização granulométrica

<i>Tyler (#)</i>	<i>Abertura (mm)</i>	<i>ANBT (n°)</i>	<i>Abertura (mm)</i>
<i>(peneiras utilizadas)</i>		<i>(peneiras equivalentes)</i>	
4	4,76	4	4,8
8	2,38	8	2,4
9	2,0	10	2,0
12	1,41	14	1,4
28	0,59		
60	0,250	60	0,250
100	0,150	100	0,150
200	0,074	200	0,074

O peneiramento foi feito com peneiras circulares com o auxílio de peneiradores vibratórios. A operação foi feita a seco, e nas frações abaixo de 0,15 mm aplicou-se um repeneiramento a úmido, para verificar a quantidade de finos passantes com lavagem. O tempo de peneiramento foi de 30 minutos, e obedece os padrões de limites de tempo de peneiramento das normas BS 1756 e ASTM D452.

O material coletado a úmido (minerações de areia e minerações de brita com beneficiamento a úmido) sofreu peneiramento integralmente a úmido.

Granulometria de finos: Para os resíduos da mineração de areia obtidos tanto na amostragem instantânea como na intensiva foi feita a determinação granulométrica por difração a laser. Esta análise foi realizada no Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas da EPUSP e utilizou a técnica do espalhamento da luz laser de baixo ângulo (difração), através do Analisador de Partículas Malvern 3600 Ec, que fornece a distribuição de tamanhos de partículas sólidas na faixa de 0,05 a 3500 μm em meio líquido.

5.4.6. Análise visual

A análise visual dos resíduos foi feita para observação de algumas feições morfológicas e texturais dos resíduos, em caráter qualitativo. Foi utilizado um microscópio estereoscópico (aumento de 6 a 66x), marca Zeiss (modelo SV11), acoplado à uma câmera fotográfica digital para captação de imagens. O tratamento das imagens foi feito no Software Leica Qwin. Esta análise foi realizada no Laboratório de Petrografia Sedimentar do Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental do IGc-USP.

Os materiais analisados foram os pós de pedra das minerações de brita e as frações granulométricas separadas para ensaios específicos. A separação foi feita por peneiramento, a seco ou a umido.

As frações menores de 0,074 mm não foram analisadas, pois o microscópio utilizado não é adequado para tal dimensão. Considerando os objetivos desta análise, não foi necessário detalhar tais frações.

Os resíduos de mineração de areia, predominantemente abaixo desta granulometria, não foram analisados visualmente.

5.4.7. Análises instrumentais

As análises instrumentais compreendem as técnicas analíticas que permitem caracterizar praticamente todos os tipos de materiais, através de equipamentos modernos de elevada precisão. Podem ser subdivididas em técnicas analíticas químicas e mineralógicas, sendo que as primeiras permitem a determinação da composição química do material que está sendo estudado, em termos quantitativos e qualitativos, e as segundas identificam, quantificam e fornecem dados composicionais de espécies minerais, proporcionando a avaliação de aspectos de associações minerais.

5.4.7.1. Análises químicas

As análises químicas quantitativas foram efetuadas pelo método de Espectrometria por Fluorescência de Raios-X no Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas da EPUSP. O princípio

básico deste método é a excitação do átomo a ser dosado, e a quantificação da resposta obtida, por meio de emissão atômica.

O método analítico adotado foi de análise sem padrão (*standardless*) em pastilha direta, em equipamento sequencial Philips PW1400, com resultados tratados no software SemiQ. Este método, embora forneça uma análise semi-quantitativa por não atingir a exatidão ideal esperada em análises químicas, habilita uma análise completa e boa precisão, motivo de ter sido escolhido.

As características químicas estão diretamente relacionadas com a composição mineralógica, sendo que a determinação da composição química é essencial para muitas das finalidades das Indústrias Cerâmica e Vidreira. A maioria das especificações técnicas para os diversos usos industriais limita os teores de SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , MnO_2 , Na_2O , K_2O , CaO , MgO , ~~CaO~~ , TiO_2 , P_2O_5 e Perda ao Fogo (P.F.), tendo sido estes os elementos prioritariamente investigados.

As análises químicas foram feitas em todos os materiais coletados na amostragem instantânea, e nas frações de interesse daqueles coletados na amostragem intensiva.

5.4.7.2. Análises mineralógicas

O conhecimento da composição mineralógica dos resíduos é importante para a maioria dos usos industriais. O simples conhecimento dos minerais permite a inferência de algumas de suas propriedades tecnológicas (químicas, físicas e mecânicas). Esta análise envolve, além da mineralogia dos grãos, a observação da sua morfologia, textura superficial, estado de alteração, presença de substâncias nocivas, dentre outras características interessantes à finalidade que se destina.

A análise mineralógica permite a identificação dos minerais presentes, grau de cristalinidade e as fases minerais presentes. Dentre as técnicas analíticas, a difração de raios-X é uma das principais ferramentas utilizadas. O princípio deste método é a utilização de um feixe de raios X, que é difratado pelo edifício cristalino dos minerais presentes, habilitando a sua identificação, que é obtida por comparação do difratograma da amostra com o banco de dados do ICDD (International Centre Diffraction Data).

A análise mineralógica foi efetuada no Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas da EPUSP e teve apenas caráter de identificação da assembléia mineral, sem detalhamento, feita nas frações de interesse dos resíduos coletados durante a amostragem intensiva. Com os resultados da composição mineralógica dos resíduos, foi avaliado o comportamento dos minerais durante o processo de beneficiamento, tanto na produção de brita quanto na de areia.

5.4.8. Ensaios tecnológicos específicos

Para a determinação da viabilidade do uso dos resíduos nas indústrias de aplicação foi fundamental a execução de ensaios tecnológicos específicos para cada um dos setores envolvidos. Estes ensaios estão descritos separadamente nos itens a seguir.

5.4.8.1. Ensaios cerâmicos

Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Matérias-Primas Particuladas e Sólidos Não-Metálicos do Departamento de Química da Escola Politécnica da USP. Foram feitos ensaios cerâmicos com os resíduos coletados durante a amostragem intensiva: a fração abaixo de 0,074 mm do pó de pedra (BR12 / BR17 / BR31) e dos finos de pedreira (BR16), e com os finos residuais das minerações de areia (AR06 / AR25 / AR42c e AR42g).

Os ensaios voltaram-se para uma avaliação preliminar do uso potencial dos resíduos na indústria cerâmica, sem a elaboração de misturas e composições com outras matérias-primas. Foram moldados corpos-de-prova, de dimensões 60 x 20 x 4 mm, moldados por prensagem sob pressão de 24 MPa (**FOTOS 5.15 e 5.16**), pesando cerca de 8g. Nos corpos-de-prova secos em estufa a 110°C (verde) e queimados em três temperaturas, foram feitas determinações de índice de cor, retração linear, umidade, módulo de ruptura à flexão, absorção d'água, porosidade aparente, massa específica aparente e perda ao fogo.

As temperaturas escolhidas foram aquelas usualmente utilizadas nos diversos setores das indústrias cerâmicas: 950°C (temperatura de queima para cerâmica vermelha), 1.100°C (temperaturas médias para as queimas de revestimentos) e

1.250°C (temperatura usual para cerâmica branca), 1.450°C (mínimas queimas de refratários). A queima foi feita em fornos de laboratório (FOTOS 5.17 e 5.18).

FOTO 5.15 – Prensa utilizada para moldagem dos corpos-de-prova

FOTO 5.16 – Moldagem dos corpos-de-prova

FOTO 5.17 – Forno utilizado para a queima (< 1250 °C)

FOTO 5.18 – Forno utilizado para a queima (> 1250 °C)

A determinação da tensão de ruptura à flexão, um dos mais importantes parâmetros físicos a serem obtidos em ensaios cerâmicos, foi feita com o auxílio de

uma prensa hidráulica, que aplica uma força com pressão progressiva controlada no centro do corpo de prova até o seu rompimento.

A partir da determinação de alguns parâmetros (coloração, absorção d'água, porosidade, massa específica aparente e resistência mecânica à flexão), foi feita a classificação de qual o uso a ser dado aos materiais submetidos aos ensaios, cujas grandes divisões são os usos em cerâmica vermelha, branca e de revestimentos, segundo SOUZA SANTOS (1989).

5.4.8.2. Ensaios para vidro

Os ensaios tecnológicos voltados para a indústria vidreira tiveram como objetivo verificar a utilização dos resíduos em alguns tipos de vidros com aplicação mais tradicional e maior flexibilidade de especificações, como os vidros para embalagens. As composições de matéria-prima feitas seguiram as recomendações do Instituto de Cerâmica e Vidro de Madrid, referência básica da indústria do vidro e utilizadas no Centro de Técnico de Elaboração do Vidro (CETEV) da Vidraria Santa Marina, onde foram realizados os ensaios de fusibilidade.

A fração granulométrica dos resíduos utilizada para a execução destes ensaios foi determinada pelas especificações requeridas para a fabricação de vidros, que é o intervalo é passante na malha 28 # (-0,59mm) e retido na malha 200 # (+0,074mm). Os materiais usados nos ensaios foram o pó de pedra (BR12 e BR31), que foram escolhido dentre aqueles que apresentaram os menores teores de ferro, e o resíduo de mineração de areia (AR42c) que apresentou grande quantidade de material com granulometria maior que 0,074 mm.

Os resultados obtidos foram indicativos do comportamento dos resíduos, apenas habilitando a uma avaliação comparativa de cores e fusibilidade. Uma etapa seguinte, não contemplada por este projeto, incluiria um maior detalhamento da fonte geradora de resíduos para a verificação da constância no fornecimento como matéria-prima, bem como testes industriais.

Ensaio de fusibilidade: para este ensaio foram feitas misturas dos resíduos com areia padrão utilizada na Vidraria Santa Marina (areia Jundu), balanceada com barrilha e sulfato de sódio, à qual se adicionou fundente (calcário), em algumas

dosagens pré-estabelecidas. Os materiais foram aplicados na sua granulometria original (**FOTO 5.19 e 5.20**), e foram compostas misturas com massas adequadas para gerar 1 kg de vidro. As misturas foram mecanicamente homogeneizadas em pó (**FOTO 5.21**), procedimento necessário apenas em escala de laboratório pois na escala industrial a homogeneização das matérias-primas acontece diretamente dentro do forno.

FOTO 5.19 – Composição do vidro com matérias-primas

FOTO 5.20 – Pesagem dos materiais

FOTO 5.21 – Homogeneização em pó

A mistura homogeneizada foi colocada em um cadinho de platina-ouro-ródio central a um forno pré-aquecido na temperatura de 1.460°C . A mistura é colocada, paulatinamente, (**FOTO 5.22**), em três operações defasadas de 30 minutos, visando permitir a natural migração e eliminação de bolhas formadas na fusão. Após 1h30' a temperatura é elevada para 1.520°C , permanecendo por 1 hora. Ocorre, então, injeção de argônio (por 1 minuto) na massa fundida (**FOTOS 5.23 e 5.24**), também com objetivo de eliminação de bolhas; e completado o ciclo de 3h00' a massa fundida é vertida em um molde. O vidro acomodado no molde (**FOTOS 5.25, 5.26 e**

5.27) e, ainda incandescente, é colocado em uma mufla (FOTO 5.28) para recozimento à temperatura de 670°C por um período de 15 horas. Por métodos visuais faz-se a avaliação da qualidade do vidro formado quanto à homogeneidade, cor e presença de infusíveis ou de máculas.

FOTO 5.22 – Adição da mistura no forno (2ª operação)

FOTO 5.23 – Injeção de argônio para redução de bolhas

FOTO 5.24 – Injeção de argônio para redução de bolhas

FOTO 5.25 – Conformação do vidro após fusão

FOTO 5.26 – Conformação do vidro após fusão

FOTO 5.27 – Vidro conformado

FOTO 5.28 – Recozimento em mufla

5.4.8.3. Ensaios em pavimentos de concreto

Os ensaios voltados para uso dos resíduos em pavimentos de concreto foram agrupados de acordo com o tipo de informações geradas: os ensaios de determinação de parâmetros gerais do agregado e os ensaios específicos para pavimentação de concreto simples (CS) e compactado a rolo (CCR). Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Concreto da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

Dentre os ensaios gerais, foram determinados parâmetros que pudessem fornecer dados amplos e abrangentes a respeito dos pó de pedra das pedreiras indicadas para estudos específicos, realizados segundo normas ABNT e ABCP, tais como:

- ♦ massa específica (NBR 9776/87 - PO-GT-2021);
- ♦ massa unitária estado solto (NBR 7251 - PO-GT-2019); e
- ♦ teor de material pulverulento (NBR 7219 - PO-GT-2018).

Outros parâmetros, tais como teor de argila em torrões e impurezas orgânicas, geralmente exigidas para caracterizar os agregados miúdos utilizados no concreto, não foram determinados, uma vez que os materiais resultantes da britagem de rochas graníticas não são assim contaminados.

A partir da caracterização do agregado miúdo, foram fixadas algumas variáveis para a elaboração do traço do CS, tais como consumo de cimento (380

kg/cm³), tamanho do agregado graúdo (Pedra 1) e abatimento no tronco do cone (30 mm ± 10 mm).

A seleção dos materiais para a execução dos ensaios de concreto foi feita para os pós de pedra coletados na amostragem intensiva, sendo que a quantidade de material disponível foi o principal critério estabelecido para a determinação de seus parâmetros. Para a amostra que possuía maior massa (BR17) foi elaborada a curva de Abrams, com o estabelecimento de 3 relações água/cimento (0,4/0,5/0,6), e obtida a melhor relação, aplicou-se o ponto ótimo para os demais materiais (BR12/BR29/BR31) com as mesmas variáveis fixadas. Para um dos materiais (BR29) também foi feito o traço do concreto com retirada da fração -0,074 mm por peneiramento a seco, ou seja, com a simulação de uma areia de brita, e levantadas as diferenças.

Além do ensaio para concreto simples, foi também feita uma dosagem para CCR, sendo que o material utilizado (BR12) foi o pó de pedra de um dos casos submetidos aos ensaios de CS. Um dos principais parâmetros a ser determinado para o caso do CCR é a umidade ótima, com o consumo de cimento estabelecido em 100 kg/cm³. À seguir, foi elaborado o traço do CCR para utilização em sub-base, e feitos os corpos-de-prova, do mesmo modo.

Preparo do concreto

A elaboração dos corpos-de-prova seguiu os padrões adotados pela ABCP (NBR 5738). Depois de homogeneizado (em pilha) o material a ser ensaiado, é colocado na betoneira (**FOTO 5.29** - capacidade mínima = 25 litros), seguindo a ordem Pedra / Água / Cimento / Areia, sendo que na primeira adição, pedra + água são misturadas por 15 segundos, e após o acréscimo de cimento mistura-se por mais 45 segundos, seguindo a adição de areia por 3 minutos (**FOTO 5.30**).

O concreto fresco é vertido em um cone (**FOTO 5.31**), cujo preenchimento é feito em 3 porções de volumes aproximadamente iguais, com aplicação de 25 golpes em cada uma. São, então, medidas a massa específica e o abatimento.

FOTO 5.29 – Betoneira (capacidade mínima = 25 litros)

FOTO 5.30 – Mistura do concreto

FOTO 5.31 – Cone (cálculo de abatimento)

O desenforme do cone deve ser em até 9 segundos, quando faz-se a medida do abatimento (**FOTO 5.32**). Caso o valor obtido esteja dentro das especificações, o concreto é colocado nas formas cilíndricas (**FOTO 5.33**) para o ensaio de resistência à compressão simples, ou prismáticas (**FOTO 5.34**) para o ensaio de resistência à tração na flexão. Se o abatimento no tronco do cone não estiver dentro do especificado, faz-se a correção da relação água/cimento, e mede-se novamente. Os moldes são colocados em uma mesa vibratória para uma melhor compactação do concreto fresco (**FOTO 5.35**)

FOTO 5.32 – Cálculo de abatimento do tronco do cone

FOTO 5.33 – Formas de corpos-de-prova cilíndricos

FOTO 5.34 – Formas de corpos-de-prova prismáticas

FOTO 5.35 – Mesa vibratória

Os moldes permanecem cobertos por 24 horas para não haver perda d'água por evaporação. Após este período, são colocados em câmara úmida (FOTOS 5.36 a 5.39, 95 % de umidade, $T=20 \pm 3^{\circ}\text{C}$) para a cura dos corpos-de-prova, que só são

desenformados quando não existir mais problemas de trincamento, estes definidos visualmente.

FOTO 5.36 – Câmara úmida

FOTO 5.37 – Câmara úmida

FOTO 5.38 – Corpos-de-prova de CS

FOTO 5.39 – Corpos-de-prova de CCR

O rompimento dos corpos-de-prova foi feito em 3, 7, 14 ou 28 dias, dependendo da quantidade de corpos-de-prova que conseguiu-se fazer, e a determinação de resistências à compressão simples (NBR 5739/84) e tração na flexão (NBR 12142/91) feitas, respectivamente, em prensa (FOTOS 5.40 e 5.41) e em flexômetro (FOTOS 5.42 e 5.43).

FOTO 5.40 – Prensa (ensaio de resist. à compressão)

FOTO 5.41 – Prensa (ensaio de resist. à compressão)

FOTO 5.42 – Flexômetro (ensaio de resist. à tração)

FOTO 5.43 – Flexômetro (ensaio de resist. à tração)

5.5. TRATAMENTO E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Os dados obtidos no decorrer desta pesquisa são apresentados e discutidos de forma a disponibilizar as informações, organizadas segundo a produção de resíduos, suas características tecnológicas e sua potencial aplicação e utilização.

É feita uma análise que contempla a discussão dos resultados da caracterização tecnológica dos resíduos da mineração de areia e brita. Os

resultados dos ensaios específicos forneceram indicações das potencialidades de aplicação dos resíduos em cada setor enfocado.

Os setores industriais de potencial aplicação dos resíduos abrangem especificações bastante variáveis das matérias-primas empregadas. Procurou-se, então, levantar as principais especificações genéricas requeridas pelos diversos setores industriais que são alvos consumidores potenciais dos resíduos e que nortearam os estudos tecnológicos desenvolvidos nesta pesquisa. O levantamento apoiou-se em dados de literatura e instituições do setor.

13049

CAPÍTULO 6 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo reúne os resultados da pesquisa, tanto aqueles obtidos na compilação bibliográfica inicial, acrescidas das informações decorrentes das atividades de campo, como os dados gerados em laboratório, com avaliação e tratamento dos mesmos.

6.1. MINERAÇÕES ATIVAS NA RMSP

As informações apresentadas referem-se ao período 1998-2000, sendo que os dados de produção, capacidade instalada, operação dos empreendimentos e preço são relativos à época dos trabalhos de campo, entre março de 1999 e fevereiro de 2000. Estes dados estão sujeitos a variações devido a oscilações do mercado e melhorias na estrutura das empresas.

As minerações em atividade durante o período estudado podem ser visualizadas nas **FIGURAS 6.1 e 6.2**, compreendendo **39 minerações de brita e 66 minerações de areia**.

Geograficamente, há uma concentração de minerações em pólos de produção, tanto nas pedreiras quanto nas minerações de areia. Para as minerações de brita, verificou-se a existência dos pólos nas regiões de Perus (SP)/Caieiras/Cajamar, Rod. Presidente Dutra (Santa Isabel/Arujá), Barueri/Castelo Branco, Itapequerica da Serra/Embu e Guarulhos/Mairiporã. Os pólos encontrados para o setor de areia são principalmente situados nas regiões sul de SP (Parelheiros), Mogi das Cruzes/Guararema, Guarulhos/Arujá e Itaquaquecetuba/Suzano.

LOCALIZAÇÃO DA ÁREA NO ESTADO DE SÃO PAULO

Minerações de Brita

BR 01	Porto de Areia Sete Praias Ltda.	BR 21	Pedreira Itapisserra Ltda.
BR 02	Pedreira Alvenaria S/A	BR 22	Pedreira Mariutti Ltda.
BR 03	Pedreira São Matheus S/A	BR 23	Embu S/A Eng. e Comércio (Itapeti)
BR 04	Pedreira Lageado	BR 24	Pedreira Anhanguera S/A (Rib. Pires)
BR 05	Itacema Mineração e Engenharia Ltda.	BR 25	Pav. e Const. Vicente Matheus Ltda.
BR 06	Pedreira Cachoeira Ltda.	BR 26	Pedreira Dutra Ltda.
BR 07	Iúdice Mineração Ltda.	BR 27	Pedreira Nassau Ltda.
BR 08	Panorama Industrial de Granitos S/A	BR 28	Pedreira Santa Isabel Ltda.
BR 09	Mineradora Pedrix Ltda.	BR 29	Pedreira Satgon Ltda.
BR 10	Territorial São Paulo - Contrucap	BR 30	Mendes Júnior S/A (Ped. Fortes)
BR 11	Pedreira Anhanguera S/A (Cajamar)	BR 31	Reago Indústria e Comércio Ltda.
BR 12	Embu S/A Eng. e Comércio (Juruaçu)	BR 32	Paupedra - Pedreira Pav. e Const. Ltda.
BR 13	Pedreira Anhanguera S/A (M. Grande)	BR 33	Firpavi Const. e Pavimentadora Ltda.
BR 14	Mineração Brita Brás Ltda. (Cajamar)	BR 34	Pedreiras Cantareira Ltda.
BR 15	Constran S/A Const. e Comércio	BR 35	Concremix Eng. de Concreto S/A
BR 16	Minerpav Mineração Ltda.	BR 36	Galvão Engenharia S/A
BR 17	Mineração Brita Brás Ltda. (Barueri)	BR 37	Industrial Min. Pagliato Ltda.
BR 18	Geocal Mineração Ltda.	BR 38	Engexplo Desmonte e Expl. Ltda.
BR 19	Serveng-Civilsan S/A	BR 39	Cia de Min. Biritiba Ussu Ltda.
BR 20	Embu S/A Eng. e Comércio (Embu)		

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA SEDIMENTAR E AMBIENTAL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE RESÍDUOS DA MINERAÇÃO
DE AGREGADOS DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO,
VISANDO SEU APROVEITAMENTO ECONÔMICO

MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS PEDREIRAS DA RMSP

DATA	Outubro / 2000	ESCALA	1 : 400.000	TÍTULO	FIGURA 6.1
MESTRANDA	GLÁUCIA CUCHIERATO

LOCALIZAÇÃO DA ÁREA NO ESTADO DE SÃO PAULO

Minerações de Areia

AR 01	Sarp Extração de Areia Ltda.	AR 23	Ext. de Areia e Ped. Cachoeira Ltda.	AR 45	Mineração MM. Ltda.
AR 02	Mineradora RAF Ltda.	AR 24	Empresa de Mineração JBS Ltda.	AR 46	Sociedade Caulinita Ltda.
AR 03	Inesal - Ind. Extrativa Santos Ltda.	AR 25	Itaquareia Ind. Ext. de Minérios Ltda.	AR 47	Ponte Alta Extração de Areia Ltda.
AR 04	Empresa de Mineração Brejão Ltda.	AR 26	Justo Extração de Areia Ltda.	AR 48	Arenas Ext Com de Prod Minerais Ltda.
AR 05	Armando Angelini - FI	AR 27	Real Emp. Extrativa de Areia Ltda.	AR 49	Itaquareia Ind. Ext. de Minérios Ltda.
AR 06	Embu S/A Eng. e Comércio	AR 28	Proviga Ind. Min. Ltda. (Fontoura)	AR 50	Emp.de Min.Menegon Ltda. (Proviga)
AR 07	Firpavi - Const. e Pavimentadora Ltda.	AR 29	Proviga Ind. Min. Ltda. (Extral)	AR 51	Cessi Com. de Mat. para Const. Ltda.
AR 08	Empresa de Mineração Caravelas Ltda.	AR 30	Proviga Ind. Min. Ltda. (Jomafe)	AR 52	Ext. de Areia Paratef Ltda.
AR 09	Mineração Areíscia Ltda.	AR 31	Empresa de Mineração Horil Ltda.	AR 53	ATIC - Areia, Ext. Ind. e Com. Ltda.
AR 10	Erika Kehrle	AR 32	Itapisserra Mineração Ltda.	AR 54	Raul Lerário
AR 11	Itaquareia Ind. Ext. de Minérios Ltda.	AR 33	Empresa de Mineração Lopes Ltda.	AR 55	Mineração Renascer Ltda.
AR 12	Mandy Mineração e Eng. Ltda.	AR 34	Cernica Mineração Ltda	AR 56	Mineração Ramos Marques Ltda.
AR 13	José dos Santos Ferreira	AR 35	Emp. de Mineração Ressaca Ltda.	AR 57	Flori Mineração Ltda.
AR 14	Emp. Mineração Floresta Negra Ltda.	AR 36	Porto Jovem Guarda Ltda.	AR 58	Paupedra - Pedreira Pav. Const. Ltda.
AR 15	Mogi-Minas Mineração e Transp. Ltda.	AR 37	Amílcar Pereira Martins Ltda.	AR 59	Empresa de Mineração JBS Ltda.
AR 16	Itaquareia Ind. Ext. de Minérios Ltda.	AR 38	Aminex Min. e Ext. de Areia Ltda.	AR 60	Iúdice Mineração Ltda.
AR 17	Itaquareia Ind. Ext. de Minérios Ltda.	AR 39	Porto de Areia Sete Praias Ltda.	AR 61	Mineradora Pedrix Ltda.
AR 18	Porto de Areia e Ped. Salbro Luso Ltda.	AR 40	Emp. de Mineração e Ext. Olifar Ltda.	AR 62	Embu S/A Eng. e Comércio (Itapeti)
AR 19	Porto e Ext. de Areia Três Coroas Ltda.	AR 41	Porto de Areia Palmeiras Ltda.	AR 63	Pedreira Sargon Ltda.
AR 20	Dutra - Extração de Areia Ltda.	AR 42	Viterbo Machado Luz Mineração Ltda.	AR 64	Reago Indústria e Comércio Ltda.
AR 21	Empresa Mineradora Boa Sorte Ltda.	AR 43	Lauro Pavan & Cia Ltda.	AR 65	Panorama Industrial de Granitos Ltda.
AR 22	Extração de Areia Taboão Ltda.	AR 44	João Carlos Pongiluppi Mineração	AR 66	Minerpav Mineração Ltda.

CONVENÇÕES

- Sede do Município
- Limite de Município
- Auto-estradas
- Estradas pavimentadas
- Rodoanel (traçado planejado)
- Drenagens
- Reservatórios
- Área Urbanizada
- Pedágios
- Empresas produtoras de areia visitadas
- Demais minerações de areia

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA SEDIMENTAR E AMBIENTAL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE RESÍDUOS DA MINERAÇÃO
DE AGREGADOS DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO,
VISANDO SEU APROVEITAMENTO ECONÔMICO

MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS MINERAÇÕES DE AREIA DA RMSP

DATA
Outubro / 2000

ESCALA
1 : 400.000

TÍTULO
FIGURA 6.2

MESTRANDA
GLÁUCIA CUCHIERATO

6.1.1. Minerações de Brita

O panorama da produção de brita na RMSP, aqui apresentado e discutido, foi obtido por compilação das informações disponíveis na literatura, acrescidas de dados gerados no presente trabalho. Verificou-se que o setor está muito bem organizado, com um sindicato forte representando as pedreiras em São Paulo. A partir do SINDIPEDRAS foi possível localizar todas as pedreiras em mapa, selecionar as minerações para visitas e estudos de caso e contactar os responsáveis (gerentes industriais / engenheiros de minas).

Na etapa de campo, foram necessários refinamentos quanto à localização das pedreiras e atualização das ativas, além de verificações de por quanto tempo ainda estarão em atividade (vida útil da jazida). Durante o período estudado, uma das minerações foi paralisada, e uma outra encerrou definitivamente suas atividades, o que resultou em um universo de 39 pedreiras.

Foram visitadas 20 minerações, representando aproximadamente 50 % do total em atividade na RMSP, o que permitiu avaliar a situação das pedreiras e operações típicas vigentes. Assim, quanto à produção e capacidade instalada, verificou-se o panorama ilustrado na **FIGURA 6.3**.

FIGURA 6.3 – Produção e capacidade instalada das pedreiras da RMSP visitadas no projeto (1999-2000)

O mercado de brita na RMSP está atualmente em uma posição instável, aguardando o reaquecimento da economia nacional, com estímulo do setor de construção civil e aumento de obras básicas de infra-estrutura para o desenvolvimento social. A demanda se apresenta reprimida, com a sub-utilização da capacidade instalada na estrutura atual, que é de 71,5 % em média, com variação de 8 a 100 %. Das 20 pedreiras, apenas uma está operando em dois turnos; o restante reduziu a jornada de trabalho como forma de redução de custos, e também para não aumentar o estoque dos produtos. Em geral, a produção é voltada para concreto, blocos pré-fabricados e pavimentação asfáltica, sendo baixa a demanda de pedra britada para a uso em obras públicas. Os preços aplicados no ano de 1999 na RMSP variaram de R\$ 10,00 a R\$ 14,00 por metro cúbico.

Um evento importante que tem fomentado o investimento em melhorias nas instalações de algumas pedreiras é o início das obras do Anel Viário Metropolitano (Rodoanel), cujo traçado aproxima-se de algumas pedreiras na região norte da RMSP (Perus, Caieiras, Cajamar). Uma das pedreiras estudadas será desapropriada, pois o traçado do Rodoanel está projetado para atravessar a cava e as instalações do beneficiamento. Em outra pedreira, parte da reserva será esterilizada com a área destinada ao projeto. A duplicação e conservação das rodovias, após a privatização das concessões rodoviárias, vem consumindo grandes quantidades de agregados e se tornado outro fator estimulante do setor.

As pedreiras podem ser subdivididas em três grupos quanto ao beneficiamento: aquelas que operam a seco, com produção de pedrisco e pó de pedra (frações finais); aquelas que operam a úmido, com a lavagem do pedrisco e produção de areia de brita com descarte dos finos de pedreira; e aquelas que operam a seco mas possuem uma estrutura flexível, e podem produzir areia de brita quando há demanda, ou pedrisco e pó, se este for o produto exigido pelo mercado. Neste contexto, observa-se a distribuição indicada na **FIGURA 6.4**, para as empresas visitadas.

FIGURA 6.4 – Tipos de beneficiamento das pedreiras da RMSP visitadas pelo projeto (50 % do total)

Os materiais atualmente produzidos nas minerações estão listados na **TABELA 6.1**, onde são verificados os intervalos granulométricos aplicados pelas empresas. Nota-se que, em geral, não seguem as normas da ABNT (NBR 7225, ABNT 1993), atendendo basicamente às solicitações do mercado, normalmente da indústria de concreto.

TABELA 6.1 - Produtos típicos das pedreiras da RMSP

BENEFICIAMENTO A SECO		BENEFICIAMENTO A ÚMIDO	
Produtos	Intervalos Granulométricos	Produtos	Intervalos Granulométricos
Rachão	(± 110 mm)	Rachão	(± 110 mm)
Bica corrida	(-30 mm)	Bica corrida	(-30 mm)
Brita graduada*	(-22 mm)	Brita graduada*	(-22 mm)
Pedra 04**	(-70 mm +50 mm)	Pedra 04**	(-70 mm +50 mm)
Pedra 03**	(-50 mm +32 mm)	Pedra 03**	(-50 mm +32 mm)
Pedra 02	(-26,5 mm +32 mm)	Pedra 02	(-26,5 mm +32 mm)
Pedra 01	(-22 mm +11 mm)	Pedra 01	(-22 mm +11 mm)
Pedra ½	(-11 mm + 9,5 mm)	Pedra ½	(-11 mm + 9,5 mm)
Pedrisco misto	(-9,5 mm)	Pedrisco limpo	(-9,5 mm + 4,8 mm)
Pedrisco limpo	(-9,5 mm + 4,8 mm)	Areia de brita	(-4,8 mm +0,15 mm)
Pó de pedra	(-4,8 mm)	Finos de pedreira ***	(-0,15 mm / -0,075 mm)

* varia com especificação do cliente

** são produzidos quando existe demanda

*** esta fração é um resíduo descartado em bacias de decantação, não constituindo um produto.

Os produtos apresentados na **TABELA 6.1** podem ser produzidos pela planta de beneficiamento de uma pedreira, mas a efetiva produção é indicada pelo mercado consumidor. Atualmente, a maior comercialização é de Pedra 01, e as frações de maiores dimensões são, geralmente, rebitadas em plantas versáteis, adequadas para este fim. O processo de rebitagem tem como desvantagem o acréscimo na geração de pó de pedra, e algumas pedreiras estão se equipando com britadores de impacto visando a minimização na produção de finos.

6.1.2. Minerações de Areia

O setor de areia varia, principalmente, segundo a situação legal, porte do empreendimento e método de lavra e tipo de beneficiamento. Este setor não possui a mesma organização do setor das pedras britadas, mesmo com a existência do SINDAREIA. Para verificar quais estavam ativas e localizá-las em mapa foi necessária a checagem com auxílio de GPS durante as visitas às minerações, além de consulta a diversas fontes de informações e pessoas do setor.

O mercado produtor de areia na RMSP, apesar de não suprir a demanda interna, também está em uma posição instável, devido aos mesmos fatores evidenciados para brita. Em geral, a produção é destinada a concreteiras, pavimentadoras, construções-formigas / revendedores de materiais para construção e obras civis em geral. Os preços aplicados em 1999/2000 variaram de R\$ 9,00 a R\$ 15,00 o metro cúbico.

Notou-se que existem vários tipos de minerações que produzem e abastecem de areia na RMSP. Além dos tipos descritos no item 3.4.2, existem as empresas de outros bens minerais, em que a areia participa como subproduto, caso em que se inserem as pedreiras e minerações de caulim ou argila para cerâmica (**FIGURA 6.5**). Algumas pedreiras estão aumentando a produção de areia de brita, obtida pela lavagem do pedrisco, e desta forma, estes subprodutos tornam-se uma interessante fonte alternativa de abastecimento de areia na RMSP.

FIGURA 6.5 – Universo de empresas produtoras de areia na RMSP

Foram visitadas 08 minerações de areia e 06 pedreiras que produzem areia de brita como subproduto, o que representa 21,5 % do total de empresas em atividade na RMSP. Apesar da menor representatividade deste número de visitas em relação ao realizado junto as minerações de brita, obteve-se um quadro preliminar da situação das empresas e das operações instaladas. Não foram escolhidas para visita as minerações de caulim pois os resíduos não são arenosos, uma vez que a própria areia é um subproduto.

Os materiais que podem ser produzidos nas minerações apresentam-se listados na **TABELA 6.2**, sendo que a maioria das empresas não efetuam a classificação da areia nestas faixas granulométricas por falta de exigência do mercado.

TABELA 6.2 - Produtos típicos das minerações de areia da RMSP

PRODUÇÃO DE AREIA	
Produtos	Intervalos granulométricos
Cascalho	(+4,8 mm)
Pedrisco	(-4,8 +2,0 mm)
Areia Grossa	(-2,0 +1,2 mm)
Areia Média	(-1,2 +0,42 mm)
Areia fina	(+0,42 -0.074 mm)

Percebeu-se que nas minerações de areia existe grande interesse na utilização dos resíduos, que atualmente estão esgotando a capacidade das bacias

de decantação. Algumas destas empresas estão implantando modernos equipamentos (principalmente hidrociclones) nas plantas de beneficiamento para otimizar os tipos de produtos, e eventualmente podem até se adequar para aplicar os resíduos, uma vez equacionado seu aproveitamento tecnológico.

6.1.3. Áreas potenciais para produção de agregados

A partir do mapa geológico compilado, foram gerados mapas temáticos (**FIGURA 6.6 e 6.7**) que apresentam as principais unidades geológicas potencialmente produtoras de agregados minerais, bem como a localização das minerações.

As litologias tradicionais utilizadas como fonte de brita são as rochas granitóides maciças, foliadas ou orientadas, e as rochas predominantemente gnáissicas. Verificou-se que a maioria das pedreiras da RMSP situam-se no domínio de rochas graníticas propriamente dito, e apenas 01 empreendimento (BR24) localiza-se no domínio de gnaisses. Dentre as pedreiras visitadas, várias delas exploram verdadeiros gnaisses, como será apresentado no item 6.2.1.1, sendo que estas unidades correspondem a corpos pequenos não detectáveis na escala do mapa geológico.

As rochas-fonte típicas de areia são depósitos sedimentares aluviais, predominantemente areno-argilosos, depósitos de sistema fluvial meandrante, compostos de cascalho, depósitos de sistemas de leques aluviais e planície fluvial entrelaçada, com predominância de lamitos arenosos a argilosos, além de espessos mantos de intemperismo de rochas granitóides. As rochas-fonte de brita, se alteradas, constituem áreas potenciais para produção de areia. Para as minerações de areia é possível verificar nos mapas a localização dos empreendimentos e a litologia do depósito mineral.

A partir da compilação feita das unidades geológicas potencialmente exploráveis, integrada com as informações das reservas minerais requeridas junto ao DNPM (item 3.3.1) e com dados atualizados do avanço da ocupação urbana, seria possível estabelecer um planejamento estratégico dos locais potenciais para instalação de novos empreendimentos minerários. Esta é uma sugestão para aprimoramento e utilização do levantamento, sendo que tal nível de inferência não foi contemplado nesta pesquisa.

LOCALIZAÇÃO DA ÁREA NO ESTADO DE SÃO PAULO

Minerações de Brita

BR 01	Porto de Areia Sete Praias Ltda.	BR 21	Pedreira Itapisserra Ltda.
BR 02	Pedreira Alvenaria S/A	BR 22	Pedreira Mariutti Ltda.
BR 03	Pedreira São Matheus S/A	BR 23	Embu S/A Eng. e Comércio (Itapeti)
BR 04	Pedreira Lageado	BR 24	Pedreira Anhanguera S/A (Rib. Pires)
BR 05	Itacema Mineração e Engenharia Ltda.	BR 25	Pav. e Const. Vicente Matheus Ltda.
BR 06	Pedreira Cachoeira Ltda.	BR 26	Pedreira Dutra Ltda.
BR 07	Iúdice Mineração Ltda.	BR 27	Pedreira Nassau Ltda.
BR 08	Panorama Industrial de Granitos S/A	BR 28	Pedreira Santa Isabel Ltda.
BR 09	Mineradora Pedrix Ltda.	BR 29	Pedreira Satgon Ltda.
BR 10	Territorial São Paulo - Contrucap	BR 30	Mendes Júnior S/A (Ped. Fortes)
BR 11	Pedreira Anhanguera S/A (Cajamar)	BR 31	Reago Indústria e Comércio Ltda.
BR 12	Embu S/A Eng. e Comércio (Juruáçu)	BR 32	Paupedra - Pedreira Pav. e Const. Ltda.
BR 13	Pedreira Anhanguera S/A (M. Grande)	BR 33	Firpavi Const. e Pavimentadora Ltda.
BR 14	Mineração Brita Brás Ltda. (Cajamar)	BR 34	Pedreiras Cantareira Ltda.
BR 15	Constran S/A Const. e Comércio	BR 35	Concremix Eng. de Concreto S/A
BR 16	Minerpav Mineração Ltda.	BR 36	Galvão Engenharia S/A
BR 17	Mineração Brita Brás Ltda. (Barueri)	BR 37	Industrial Min. Pagliato Ltda.
BR 18	Geocal Mineração Ltda.	BR 38	Engexplo Desmonte a Expl. Ltda.
BR 19	Serveng-Civilsan S/A	BR 39	Cia de Min. Biritiba Ussu Ltda.
BR 20	Embu S/A Eng. e Comércio (Embu)		

CONVENÇÕES

- Sede do Município
- Limite de Município
- Auto-estradas
- Drenagens
- Reservatórios
- Área Urbanizada
- Minerações de brita visitadas
- Demais minerações de brita
- Rochas graníticas maciças
- Rochas graníticas foliadas
- Rochas predominantemente gnáissicas

Fonte: base cartográfica adaptada de IPT (1998)
base geológica adaptada de SABESP/CEPAS (1994),
Projeto Alto Tietê (1999) e OLIVITO (2000)

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA SEDIMENTAR E AMBIENTAL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE RESÍDUOS DA MINERAÇÃO
DE AGREGADOS DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO,
VISANDO SEU APROVEITAMENTO ECONÔMICO

MAPA DE ÁREAS POTENCIAIS PARA PRODUÇÃO DE BRITA

DATA Outubro / 2000 ESCALA 1 : 400.000 TÍTULO FIGURA 6.6

MESTRANDA GLÁUCIA CUCHIERATO

LOCALIZAÇÃO DA ÁREA NO ESTADO DE SÃO PAULO

Minerações de Areia

AR 01	Sarp Extração de Areia Ltda.	AR 23	Ext. de Areia e Ped. Cachoeira Ltda.	AR 45	Mineração MM. Ltda.
AR 02	Mineradora RAF Ltda.	AR 24	Empresa de Mineração JBS Ltda.	AR 46	Sociedade Caulinita Ltda.
AR 03	Inesal - Ind. Extrativa Santos Ltda.	AR 25	Itaquareia Ind. Ext. de Minérios Ltda.	AR 47	Ponte Alta Extração de Areia Ltda.
AR 04	Empresa de Mineração Brejão Ltda.	AR 26	Justo Extração de Areia Ltda.	AR 48	Arenas Ext Com de Prod Minerais Ltda.
AR 05	Armando Angelini - FI	AR 27	Real Emp. Extrativa de Areia Ltda.	AR 49	Itaquareia Ind. Ext. de Minérios Ltda.
AR 06	Embu S/A Eng. e Comércio	AR 28	Proviga Ind. Min. Ltda. (Fontoura)	AR 50	Emp.de Min.Menegon Ltda. (Proviga)
AR 07	Firpavi - Const. e Pavimentadora Ltda.	AR 29	Proviga Ind. Min. Ltda. (Extral)	AR 51	Cessi Com. de Mat. para Const. Ltda.
AR 08	Empresa de Mineração Caravelas Ltda.	AR 30	Proviga Ind. Min. Ltda. (Jomafe)	AR 52	Ext. de Areia Paratei Ltda.
AR 09	Mineração Areisca Ltda.	AR 31	Empresa de Mineração Horii Ltda.	AR 53	ATIC - Areia, Ext. Ind. e Com. Ltda.
AR 10	Erika Kehrl	AR 32	Itapiserra Mineração Ltda.	AR 54	Raul Lerário
AR 11	Itaquareia Ind. Ext. de Minérios Ltda.	AR 33	Empresa de Mineração Lopes Ltda.	AR 55	Mineração Renascer Ltda.
AR 12	Mandy Mineração e Eng. Ltda.	AR 34	Cemica Mineração Ltda	AR 56	Mineração Ramos Marques Ltda.
AR 13	José dos Santos Ferreira	AR 35	Emp. de Mineração Ressaca Ltda.	AR 57	Fiori Mineração Ltda.
AR 14	Emp. Mineração Floresta Negra Ltda.	AR 36	Porto Jovem Guarda Ltda.	AR 58	Paupedra - Pedreira Pav. Const. Ltda.
AR 15	Mogi-Minas Mineração e Transp. Ltda.	AR 37	Amílcar Pereira Martins Ltda.	AR 59	Empresa de Mineração JBS Ltda.
AR 16	Itaquareia Ind. Ext. de Minérios Ltda.	AR 38	Aminex Min. e Ext. de Areia Ltda.	AR 60	Lúdice Mineração Ltda.
AR 17	Itaquareia Ind. Ext. de Minérios Ltda.	AR 39	Porto de Areia Sete Praias Ltda.	AR 61	Mineradora Pedrix Ltda.
AR 18	Porto de Areia e Ped. Saibro Luso Ltda.	AR 40	Emp. de Mineração e Ext. Olifar Ltda.	AR 62	Embu S/A Eng. e Comércio (Itapeti)
AR 19	Porto e Ext. de Areia Três Coroas Ltda.	AR 41	Porto de Areia Paineiras Ltda.	AR 63	Pedreira Sargon Ltda.
AR 20	Dutra - Extração de Areia Ltda.	AR 42	Viterbo Machado Luz Mineração Ltda.	AR 64	Reago Indústria e Comércio Ltda.
AR 21	Empresa Mineradora Boa Sorte Ltda.	AR 43	Lauro Pavan & Cia Ltda.	AR 65	Panorama Industrial de Granitos Ltda.
AR 22	Extração de Areia Taboão Ltda.	AR 44	João Carlos Pongiluppi Mineração	AR 66	Minerpav Mineração Ltda.

- Sede do Município
- Limite de Município
- Auto-estradas
- Drenagens
- Reservatórios
- Área Urbanizada
- Empresas produtoras de areia visitadas
- Demais minerações de areia

LEGENDA

- Depósitos aluviais, predominantemente areno-argilosos
- Depósitos fluviais (meandrante), compostos de cascalho
- Rochas predominantemente graníticas

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA SEDIMENTAR E AMBIENTAL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE RESÍDUOS DA MINERAÇÃO
DE AGREGADOS DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO,
VISANDO SEU APROVEITAMENTO ECONÔMICO

MAPA DE ÁREAS POTENCIAIS PARA PRODUÇÃO DE AREIA

DATA
Outubro / 2000

ESCALA
1 : 400.000

TÍTULO
FIGURA 6.7

MESTRANDA
GLÁUCIA CUCHIERATO

6.1.4. Minerações visitadas e amostradas

As minerações de brita e de areia visitadas estão listadas respectivamente nas **TABELAS 6.3 e 6.4**, com indicação dos locais onde foram efetuadas as amostragens instantânea e intensiva.

TABELA 6.3 – Relação das pedreiras visitadas

CÓD.	EMPRESA	MUNICÍPIO	BENEF.	PROD	C.I.	RESÍDUOS	QUANT
BR-01	Sete Praias	São Paulo	À úmido	15.000	50.000	Finos de pedreira	10 %
BR-06*	Cachoeira	São Paulo	À seco	35.000	55.000	Pó de pedra	13 %
BR-07	Lúdice	São Paulo	À úmido	70.000	90.000	Areia de brita / Finos	05 %
BR-08*	Panorama	São Paulo	À seco (flex)	50.000	60.000	Pó de pedra / Areia de brita	n.d.
BR-09	Pedrix	Caieiras	À úmido	60.000	70.000	Areia de brita / Finos	10 %
BR-10*	Territorial	São Paulo	À seco	30.000	50.000	Pó de pedra	05 %
BR-11	Anhanguera	Cajamar	À seco	15.000	80.000	-	n.d.
BR-12**	Embu	São Paulo	À seco	35.000	50.000	Pó de pedra	10 %
BR-16**	Minerpav	Barueri	À úmido	50.000	60.000	Areia de brita / Finos	23 %
BR-17**	Brita Bras	Barueri	À seco	40.000	50.000	Pó de pedra	18 %
BR-19*	Serveng	Barueri	À seco	45.000	60.000	-	18 %
BR-20	Embu	Embu	À seco	70.000	100.000	Pó de pedra	n.d.
BR-21*	Itapisserra	Itapicacerica	À seco	50.000	50.000	Pó de pedra	42 %
BR-23	Embu	Mogi	À seco (flex)	90.000	120.000	Pó de pedra / Areia de brita	n.d.
BR-26*	Dutra	Santa Isabel	À seco	35.000	50.000	Pó de pedra	10 %
BR-28*	Santa Isabel	Santa Isabel	À seco	60.000	75.000	Pó de pedra	22 %
BR-29**	Sargon	Santa Isabel	À seco (flex)	70.000	80.000	Pó de pedra / Areia de brita	20 %
BR-30*	Mendes Jr.	Santa Isabel	À seco	20.000	50.000	Pó de pedra	25 %
BR-31**	Reago	Guarulhos	À seco (flex)	60.000	70.000	Pó de pedra	14 %
BR-34*	Cantareira	Mairiporã	À seco	70.000	75.000	Pó de pedra	30 %

TABELA 6.4 – Relação das minerações de areia visitadas

CÓD.	EMPRESA	MUNICÍPIO	DEPÓSITO	PROD.	RESÍDUOS	QUANT
AR 01*	Sarp	Barueri	Manto de alteração	n.d.	Finos	n.d.
AR 06**	Embu	São Paulo	Manto de alteração	30.000	Finos	> 10 %
AR 08*	Floresta Negra	Guarulhos	Manto de alteração	n.d.	Finos	n.d.
AR 16*	Itaquareia	Suzano	Rocha sedimentar	5.000	Finos	n.d.
AR 25**	Itaquareia	Mogi	Rocha sedimentar	10.000	Finos	n.d.
AR 32	Itapisserra	Mogi	Rocha sedimentar	20.000	Finos	> 10 %
AR 39	Sete Praias	São Paulo	Manto de alteração	5.000	Finos	10 %
AR 42**	Viterbo	São Paulo	Manto de alteração	10.000	Finos / areia fina	40 %
AR 60*	Lúdice	São Paulo	Pedreira	n.d.	Areia de brita / Finos	05 %
AR 61*	Pedrix	São Paulo	Pedreira	n.d.	Areia de brita / Finos	> 10 %
AR 62*	Embu	Mogi	Pedreira	n.d.	Areia de brita / Finos	n.d.
AR 63*	Sargon	Santa Isabel	Pedreira	n.d.	Areia de brita / Finos	> 5 %
AR 64*	Reago	Guarulhos	Pedreira	n.d.	Areia de brita / Finos	n.d.
AR 65*	Panorama	São Paulo	Pedreira	n.d.	Areia de brita / Finos	n.d.

BENEF.= tipo de beneficiamento; PROD.= produção (m³/mês); C.I.= capacidade instalada (m³/mês); QUANT.= quantidade de resíduos gerados (% em volume); n.d. = não declarada.

(*) Amostragem instantânea / Ensaios preliminares de caracterização

(**) Amostragem intensiva / Ensaios tecnológicos específicos

(*) Empresas produtoras de pedra britada que produzem areia como subproduto

Durante as visitas, pode-se observar a real problemática da geração de resíduos nas minerações de agregados, permitindo coletar dados representativos para fazer a discussão dos mesmos, vislumbrando questões técnicas e econômicas. Em algumas minerações de brita (por exemplo a BR19), os produtos finais do beneficiamento (pó de pedra e pedrisco) têm maior demanda que os agregados graúdos, não se constituindo em um problema, mas sim um produto de grande valor agregado, não se enquadrando no conceito desta pesquisa.

Em outro caso, a empresa já possuía participação no mercado de areia (BR31), quando teve problemas de esgotamento da área destinada à deposição de finos (bacias de decantação) e teve que readequar a sua planta de beneficiamento para produzir pó de pedra. Atualmente, esta alteração permite que a empresa oscile a produção de acordo com a demanda.

As visitas perfizeram metade das minerações de brita do universo da RMSP, e foram realizadas entre minerações que operam a seco, a úmido e com estrutura flexível. Acredita-se, portanto, que este valor espelhe a realidade da produção. Para as minerações de areia foram visitados cerca de um quarto do total de empresas, e apesar da menor representatividade, a partição entre os tipos de depósitos minerais e beneficiamento indicam o panorama do que se encontra atualmente em atividade, dado este a ser confirmado por trabalhos mais intensivos em levantamentos especificamente dirigidos. Com base nestas informações, estima-se que a quantidade de pó de pedra e areia de brita produzidos na RMSP é de cerca de 3,6 milhões de m³. Para os resíduos acumulados em bacias de decantação, estima-se mais de 8 milhões de m³, entre finos de pedreira e finos de mineração de areia.

Dentre as minerações visitadas, foi realizada a coleta de materiais representativos. O conjunto de amostras coletadas no projeto está apresentado na **TABELA 6.5**, sendo que as empresas onde foram realizadas estão indicadas nas notas de rodapé das **TABELAS 6.3 e 6.4**.

TABELA 6.5 – Amostragem efetuada

AMOSTRAGEM	BRITA	AREIA
Total de empresas visitadas	20	08 (+06)*
Amostragem Instantânea	12	04
Amostragem Intensiva	05	03
Coleta de Rocha-fonte	20	-

* o número entre parênteses refere-se às visitas em pedreiras que também produzem areia.

6.1.5. Minerações selecionadas para estudo de caso

As empresas selecionadas para estudo de caso, nas quais foi realizada amostragem intensiva segundo os critérios estabelecidos no item 5.2.1, apresentam-se listadas nas **TABELAS 6.6 e 6.7**. Foram selecionadas 5 minerações de brita e 3 minerações de areia.

TABELA 6.6 – Pedreiras selecionadas para estudo de caso

CÓD.	EMPRESA	CRITÉRIOS			
		Beneficiamento	Geologia	Tipo de Mineração	Interesse
BR-12	Embu	A seco	Granito	A	Alto
BR-16	Minerpav	A úmido	Granito	B	Médio
BR-17	Brita Bras	A seco	Granito	A	Alto
BR-29	Sargon	A seco (flex)	Granito	B	Alto
BR-31	Reago	A seco (flex)	Granito	B	Médio

A = Empresas totalmente profissionalizadas, controladas por grupos multinacionais

B = Empresas com estrutura familiar, com elevado nível de profissionalização

TABELA 6.7 – Minerações de areia selecionadas para estudo de caso

CÓD.	EMPRESA	CRITÉRIOS			
		Tipo de depósito	Método de Lavra	Tipo de Mineração	Interesse
AR 06	Embu	Manto de alteração	Cava seca	A	Alto
AR 25	Itaquareia	Rocha sedimentar	Cava seca	B	Alto
AR 42	Viterbo	Manto de alteração	Cava seca	B	Alto

A = Empresas totalmente profissionalizadas, controladas por grupos multinacionais

B = Empresas com estrutura familiar, com elevado nível de profissionalização

É feita a seguir uma breve apresentação das empresas selecionadas.

Embu S/A Engenharia e Comércio (BR 12/AR 06): A Embu é um grande grupo empresarial de capital nacional na área de agregados e concreto. É a empresa líder na RMSP, com a capacidade de produzir quase 300.000 m³/mês de pedra britada, em três unidades de (Itapeti/Mogi das Cruzes, Juruaçu/Perus e Embu), e uma usina de produção de areia, totalmente mecanizada, recém-instalada com projeto e equipamentos estrangeiros. É uma das empresas que mais têm investido na área de utilização de resíduos. A unidade Itapeti possui a flexibilidade de produzir areia de brita por lavagem do pedrisco. A unidade de Juruaçu recebeu um projeto de alta capacidade produtiva de areia, sendo atualmente um dos maiores produtores da RMSP.

Minerpav Mineração Ltda. (BR 16): Esta empresa destina grande parte da produção para a concreteira pertencente ao grupo Concrepav, e o restante vai para usinas de asfalto da empresa. Suas instalações utilizam equipamentos simples (caixas de decantação) para a lavagem e separação da fração fina e areia de brita. Tem grande interesse em fomentar o uso das areias de brita, uma vez que sua produção e estoque são bastante grandes.

Mineração Brita Brás Ltda. (BR 17): A empresa faz parte do grupo multinacional LAFARGE Agregados, sendo a principal fornecedora de material para a Brasil Beton, pertencente à LAFARGE Concretos. Existe grande interesse da empresa em aprimorar a aplicação do pó de pedra, através de sua caracterização tecnológica, dando novos usos para este material.

Pedreira Sargon Ltda. (BR 29) e Itaquareia Indústria Extrativa de Minérios Ltda. (AR 25): As duas empresas são pertencentes ao mesmo empresário, que também é acionista da Mineradora Pedrix Ltda. A Sargon possui a planta de beneficiamento com flexibilidade para a lavagem do pó de pedra, pedrisco e bica corrida, com produção de areia. A quantidade de finos produzida é pequena, decantada e utilizada para pequenas obras no próprio local, não figurando um material residual de impacto ambiental e econômico negativo. A Itaquareia é uma das maiores produtoras de areia da RMSP, sendo responsável por 07 frentes de lavra na região leste da RMSP (Itaquaquecetuba, Suzano e Mogi das Cruzes).

Reago Indústria e Comércio S/A (BR 31): Pertencente ao Grupo Camargo Corrêa, é a empresa mencionada anteriormente por alterar sua planta de beneficiamento para produzir pó de pedra, motivada pela insuficiência da área destinada à disposição dos finos. Atualmente, produz areia de brita, retornando ao mercado após a ampliação da capacidade das suas bacias de contenção de resíduos.

Viterbo Machado Luz Mineração Ltda. (AR 42): A Viterbo é uma empresa onde se verifica a preocupação da melhoria tecnológica da planta de beneficiamento, e otimização de suas reservas. No mesmo local, produz-se areia do manto de intemperismo e rocha ornamental dos matacões existentes e há também um projeto de produção de pedra britada quando esgotar a jazida de areia. As bacias de decantação chamam atenção devido ao seu volume elevado, e uma delas já vem sendo dragada para a separação de areia fina para o setor de argamassas. Existe grande interesse do aproveitamento dos resíduos em escala industrial. Para o estudo foram separados os materiais provenientes de duas grandes bacias de decantação: Cida (AR42c) e Global (AR42g).

6.2. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

As amostras de resíduos foram submetidas aos ensaios de caracterização descritos no item 5.4, e sumariados na **TABELA 6.8**. Nos itens a seguir são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos vários ensaios.

TABELA 6.8 – Ensaios realizados

ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	BRITA	AREIA
AMOSTRAGEM EM ROCHA-FONTE		
Análise textural	19	-
Microscopia Óptica	11	-
AMOSTRAGEM PRELIMINAR		
Classificação Granulométrica	11	05
Análise visual	12	
Análise Química	11	05
AMOSTRAGEM INTENSIVA		
Classificação Granulométrica	05	03
Análise visual	20	-
Análise Química	20	04
Análise Mineralógica	20	04
Ensaio específico para cerâmica	05	04
Ensaio específico para vidro	02	02
Ensaio específico para concreto	05	-

Análises texturais e microscópicas foram realizadas nos fragmentos de rocha das minerações de brita e tiveram como objetivo a verificação da relação da rocha-fonte com a produção dos resíduos. As análises químicas foram feitas em todos os resíduos coletados e nas frações de interesse aos ensaios tecnológicos específicos. As análises mineralógicas foram feitas apenas nas frações de interesse obtidas a partir da amostragem intensiva. Os ensaios tecnológicos específicos foram realizados apenas com as frações interessantes para cada setor.

6.2.1. Minerações de brita

Os resultados da caracterização tecnológica foram agrupados de acordo com o agregado produzido e são apresentados de forma preferencialmente sequencial, segundo os dados obtidos.

6.2.1.1. Análise textural e Microscopia Óptica

Os resultados obtidos para a análise da rocha-fonte de produção de brita apresentados nas **TABELAS 6.9 e 6.10**. As **FOTOS 6.1 a 6.18** ilustram as principais litologias, bem como algumas das suas características microscópicas.

TABELA 6.9 – Resultados da Análise Textural (descrição macroscópica) e Mineralogia Óptica (descrição microscópica) - Granitos

ANÁLISE TEXTURAL & MICROSCOPIA ÓPTICA					
COD	IM	CLASSIFICAÇÃO	ASPECTOS MACROSCÓPICOS	MINERALOGIA (% em volume)	ESTRUTURA
BR01	05	Granito 3b	Leucocrática, inequigranular, plutônica, porfirítica com matriz fanerítica média	quartzo 25, plagioclásio 25, K-feldspato 20, muscovita 15, biotita 5 e outros 5	Maciça
BR07	15	Granito 3a	Leucocrática inequigranular, plutônica, porfirítica com matriz fanerítica fina	K-feldspato 50, quartzo 30, plagioclásio 15, biotita 10, outros (titanita e zircão) 5	Levemente orientada
BR08	20	Granito 3b	Leucocrática, inequigranular, plutônica, porfirítica com matriz fanerítica média	quartzo 30, K-feldspato 30, plagioclásio 20, biotita 15, outros (anfíbólio, titanita, e opacos) 5	Maciça
BR09	10	Granodiorito	Leucocrática, equigranular, plutônica, porfirítica com matriz fanerítica média	plagioclásio 45, quartzo 40, K-feldspato 5, biotita 5, outros (muscovita, granada, e zircão) 5	Maciça
BR10	15	Granodiorito	Leucocrática, inequigranular, plutônica, porfirítica com matriz fanerítica média	quartzo 35, plagioclásio 35, K-feldspato 10, biotita 10, muscovita 5, outros (titanita e opacos) 5	Maciça
BR11	05	Tonalito	Leucocrática, equigranular, plutônica, fanerítica média	Plagioclásio 60, quartzo 35, muscovita 8, biotita 2, outros (clorita e titanita) <1	Maciça
BR12	10	Granito 3b	Leucocrática, equigranular, plutônica, fanerítica média a fina	quartzo 30, plagioclásio 25, K-feldspato 15, biotita 10, outros (clorita, zircão e opacos) 10	Maciça
BR16	25	Granito 3a	Leucocrática, inequigranular, plutônica, porfirítica com matriz fanerítica média	K-feldspato 30, quartzo 25, biotita 25, plagioclásio 10, outros (anfíbólio, titanita e opacos) 10	Maciça
BR17	25	Granito 3a	Leucocrática, inequigranular, plutônica, porfirítica com matriz fanerítica fina	quartzo 30, K-feldspato 25, biotita 20, plagioclásio 10, outros (titanita e opacos) 15	Levemente orientada
BR19	20	Granito 3b	Leucocrática, inequigranular, plutônica, porfirítica com matriz fanerítica média	quartzo 30, K-feldspato 25, plagioclásio 20, biotita 10, outros (muscovita, anfíbólio, zircão e titanita) 15	Maciça
BR21	10	Granito 3a	Leucocrática, equigranular, plutônica, fanerítica fina a média	quartzo 35, K-feldspato 35, plagioclásio 15, biotita 10, outros (muscovita e zircão) 5	Levemente orientada
BR23	15	Granito 3a	Leucocrática, inequigranular, plutônica, porfirítica com matriz fanerítica fina	K-feldspato 45, quartzo 30, biotita 15, plagioclásio 10, outros (titanita, zircão e opacos) <1	Maciça
BR29	25	Granodiorito	Leucocrática, inequigranular, plutônica, porfirítica com matriz fanerítica média a fina	plagioclásio 40, K-feldspato 20, quartzo 15, biotita 15, anfíbólio 10, outros < 1	Levemente orientada
BR31	10	Granodiorito	Leucocrática, equigranular, plutônica, fanerítica média	quartzo 35, plagioclásio 25, sericita 20, biotita 10, K-feldspato 10, outros (titanita e opacos) <1	Levemente orientada
BR34	25	Granodiorito	Leucocrática, inequigranular, plutônica, porfirítica com matriz fanerítica fina	quartzo 30, plagioclásio 20, biotita 10, sericita 10, K-feldspato 10, anfíbólio 10, outros (augita, epidoto, carbonatos, titanita e opacos) 10	Maciça

IM = Índice de máficos (%)

OBS: A classificação de rochas ígneas adotou a terminologia de STRECKEISEN (1976)

FOTO 6.1 Amostra BR01 (Granito 3b)

FOTO 6.2 Lâmina BR01

FOTO 6.3 Amostra BR07 (Granito 3a)

FOTO 6.4 Amostra BR19 (Granito 3b)

FOTO 6.5 Amostra BR08 (Granito 3b)

FOTO 6.6 Lâmina BR08

FOTO 6.7 Amostra BR21 (Granito 3a)

FOTO 6.8 Amostra BR23 (Granito 3a)

FOTO 6.9 Amostra BR12 (Granito 3b)

FOTO 6.10 Lâmina BR12

FOTO 6.11 Amostra BR16 (Granito 3a)

FOTO 6.12 Lâmina BR16

FOTO 6.13 Amostra BR17 (Granito 3a)

FOTO 6.14 Lâmina BR17

FOTO 6.15 Amostra BR11 (Tonalito)

FOTO 6.16 Lâmina BR11

FOTO 6.17 Amostra BR10 (Granodiorito)

FOTO 6.18 Lâmina BR10

FOTO 6.19 Amostra BR09 (Granodiorito)

FOTO 6.20 Lâmina BR09

FOTO 6.21 Amostra BR31 (Granodiorito)

FOTO 6.22 Lâmina BR31

FOTO 6.23 Amostra BR34 (Granodiorito)

FOTO 6.24 Lâmina BR34

TABELA 6.10 – Resultados da Análise Textural (descrição macroscópica) e Mineralogia Óptica (descrição microscópica) - Gnaisses

ANÁLISE TEXTURAL & MICROSCOPIA ÓPTICA					
COD	IM	CLASSIFICAÇÃO	ASPECTOS MACROSCÓPICOS	MINERALOGIA (% em volume)	ESTRUTURA
BR-20	40	Biotita Anfibólio Gnaisse	Lepidoblástica fortemente orientada, granulação fina com relíquias ígneas	biotita 25, quartzo 15, anfibólio 15, K-feldspato 15, plagioclásio 10, outros (epidoto, carbonato, titanita e opacos) 20	Foliação gnáissica
BR-26	35	Biotita Anfibólio Gnaisse	Granolepidoblástica, granulação fina na matriz com forte foliação gnáissica	plagioclásio 30, quartzo 25, biotita 25, anfibólio 10, outros (K-feldspato, titanita, carbonatos e opacos) 10	Foliação gnáissica
BR-28	35	Biotita Anfibólio Gnaisse	Granolepidoblástica com foliação gnáissica e granulação fina na matriz	quartzo 20, biotita 20, anfibólio 10, plagioclásio 10, carbonatos 5-10, feldspatos recristalizados 20, titanita 5 e opacos <5	Foliação gnáissica
BR-30	35	Biotita Anfibólio Gnaisse	Granolepidoblástica com forte foliação gnáissica e granulação fina na matriz	Feldspatos recristalizados 25, quartzo 20, biotita 15, anfibólio 10, K-feldspato 10, plagioclásio 5, outros (titanita e opacos) 15	Foliação gnáissica

IM = Índice de máficos (%)

OBS: A classificação de rochas ígneas adotou a terminologia de JULIANI *et al.* (1996)

FOTO 6.25 Amostra BR20 - Gnaisse

FOTO 6.26 Amostra BR26 - Gnaisse

FOTO 6.27 Amostra BR28 - Gnaisse

FOTO 6.28 Amostra BR30 - Gnaisse

FOTO 6.29 Lâmina BR20

FOTO 6.30 Lâmina BR26

FOTO 6.31 Lâmina BR28

FOTO 6.32 Lâmina BR30

Os litotipos observados nas minerações de pedra britada são todos de rochas quartzo-feldspáticas, de composição granítica, podendo ser subdivididos em: granitos (maciços e orientados) e gnaisses. Os gnaisses observados em campo, ainda que mapeados como corpos graníticos (**FIGURAS 2.1 e 6.6**), tratam-se possivelmente de feições localizadas não diferenciadas na escala de mapeamento.

Na análise textural foi determinado o Índice de Máficos (IM) para as rochas graníticas, a partir da quantidade de minerais máficos presentes nas amostras. Este mesmo índice não pode ser utilizado para gnaisses, sem qualquer conotação genética, apenas com caráter textural para fins comparativos.

Em relação à textura da rocha, observa-se que a maioria dos litotipos graníticos encontrados é porfírica com fenocristais de feldspato e matriz predominantemente máfica, média a fina, enquanto os gnaisses são geralmente granolepidoblásticos com matriz fina. Estas características sugerem o comportamento diferencial na britagem, com tendência de concentração dos minerais máficos e acessórios nas frações mais finas, e componentes quartzo-feldspáticos nas frações mais grossas dos resíduos.

Verifica-se, pela quantidade de minerais máficos (**FIGURA 6.8**), que todos os granitos são leucocráticos (índice de máficos entre 5 e 30 %), e os gnaisses são mesocráticos (índice de máficos entre 35 e 60 %).

FIGURA 6.8 - Diagrama triangular para rochas-fonte das pedreiras

Com estes valores, espera-se, pelo conhecimento empírico do setor de agregados, maiores teores de Fe_2O_3 e TiO_2 para os resíduos de rochas mesocráticas, e também uma maior quantidade da fração fina neste material. Estas relações foram verificadas, respectivamente, pela composição química e granulometria dos resíduos, discutidas nos itens específicos adiante.

Para a classificação dos granitos utilizou-se a nomenclatura de STRECKEISEN (1976), verificando que as rochas-fonte amostradas encontram-se nas classes dos granitos mais comuns: granitos do tipo 3 (3a e 3b), granodioritos e tonalitos (vide diagrama de classificação na **FIGURA 6.9**). Para os gnaisses, utilizou-se a nomenclatura adotada por JULIANI *et al.* (1996).

FIGURA 6.9 - Diagrama triangular para rochas-fonte das pedreiras

6.2.1.2. Classificação Granulométrica

A classificação granulométrica foi realizada segundo a metodologia descrita no item 5.4.4. Os resultados obtidos para as amostras de pó de pedra se encontram na **TABELA 6.12**, e as curvas granulométricas são apresentadas na **FIGURA 6.10**.

TABELA 6.12 – Resultados dos ensaios granulométricos do pó de pedra

Fração	% retida (em peso)												
(mm)	BR06	BR08	BR10	BR12	BR17	BR 19	BR 21	BR 26	BR 28	BR 29	BR 30	BR 31	BR 34
+4,76	1,04	3,25	1,68	0,67	5,15	1,21	32,22	2,92	8,15	3,76	0,51	0,01	1,13
-4,76 +2,38	26,07	15,28	13,60	14,22	21,07	19,24	18,65	29,22	23,50	22,59	20,72	0,86	20,78
-2,38 +2,00	9,55	7,61	10,44	7,28	6,94	9,87	5,69	8,27	6,32	6,60	9,38	3,95	8,61
-2,00 +1,41	9,36	7,72	11,89	8,72	7,61	9,15	4,96	6,93	5,57	6,86	8,86	9,44	8,15
-1,41 +0,59	20,64	22,97	27,76	23,18	19,05	23,92	10,74	15,65	13,42	15,56	18,44	26,34	22,83
-0,59 +0,25	12,69	18,54	16,07	18,53	14,56	16,13	9,74	12,16	13,49	13,96	11,86	19,34	16,17
-0,25 +0,15	4,93	7,32	4,68	7,72	5,77	5,72	5,35	6,53	6,97	7,30	6,55	10,00	6,48
-0,15 +0,074	5,43	6,95	5,11	12,01	11,31	5,62	5,54	7,98	10,08	14,98	8,99	14,07	6,47
-0,074	10,29	10,45	8,77	7,69	8,54	9,14	7,11	10,34	12,50	8,38	14,69	15,99	9,38

FIGURA 6.10 - Curvas granulométricas do pó de pedra

Nota-se para o pó de pedra comportamento granulométrico muito similar nas frações mais finas, com as curvas bastante próximas, e porcentagem em peso para a fração -0,074 mm variando entre 7,11 e 15,99 %, com uma média de 10,39 % e desvio padrão de 2,72. A variação se dá em função do tipo de rocha e textura, verificando-se uma maior quantidade relativa de finos para os gnaisses e para os granitos porfíricos com matriz fanerítica fina.

Nas frações mais grossas, observam-se maiores diferenças de comportamento. Em média, as amostras apresentam 95,29 % em peso passante em

4,8 mm, com desvio padrão de 8,94 e dois extremos (BR 21 e BR 31), correspondendo de 32,22 a 0,01 % na fração. Estes extremos devem-se, possivelmente, a variações no processo de beneficiamento adotado pelas pedreiras, uma vez que a BR 31 é exatamente a pedreira que está alterando constantemente sua planta para a produção de areia de brita. A composição granulométrica apresenta o corte estabelecido em 4,8 mm bem ajustado, com apenas 0,01 % retido.

Para a BR 21, a grande quantidade produzida acima de 4,8 mm se dá em atendimento à demanda. Porém, ainda existe um controle textural e litológico para as maiores quantidade de frações mais grossas, e nota-se que a maior porcentagem é gerada em granitos faneríticos a porfíricos de matriz média.

Uma possível relação entre o tipo de rocha-fonte e a quantidade de material pulverulento ($-0,074$ mm) presente nos resíduos, pode ser avaliada no gráfico da **FIGURA 6.11**, onde é mostrada a correlação entre a quantidade de material fino passante na peneira 200 # e o índice de máficos, considerando todo o universo amostrado. Nota-se que há uma dispersão de pontos quando considerado o universo de todas as litologias amostradas, sem relação direta, com separação entre os granitos e os gnaisses

FIGURA 6.11 - Relação % do material passante na fração 0,074 mm e Índice de máficos (Granitos A = textura fanerítica média; Granitos B = porfíricos com matriz média, Granitos C = porfíricos com matriz fina)

Entretanto, ao ser feita a distinção dos tipos texturais de rochas, existe uma sugestão de correlação interessante. Verificou-se, que os resíduos derivados de

rochas gnáissicas com quantidades de finos entre 10 e 15 % apresentam maior quantidade de minerais máficos (35 %). Já para os granitos, nota-se uma nuvem de tendência, com quantidades de finos entre 7 e 11 % e quantidade de máficos entre 10 e 25 %. Os granitos com textura fanerítica média mostram baixas quantidades de material abaixo de 0,074 mm e IM = 10 %. Os granitos porfiríticos com matriz fanerítica média se concentram nos valores IM = 25 % e quantidade de finos entre 8,5 e 9,5 %. Para os granitos porfiríticos com matriz fanerítica fina, verifica-se uma variação de IM entre 15 e 25 % e finos entre 8,3 e 10,5 %.

Para duas das amostras foram confrontados os resultados da composição granulométrica da amostragem instantânea, com coleta pontual da amostra, e da intensiva, com coleta da amostra ao longo de uma jornada da planta de beneficiamento. As diferenças podem ser verificadas na **TABELA 6.13** e na **FIGURA 6.12**. O cálculo da variação é dado por $\Delta = (A+B)/B \cdot 100$, expresso em %. No caso de razões imprecisas, não é indicado o valor.

TABELA 6.13 – Variação da granulometria, segundo tipo de amostragem

Fração (mm)	BR 17			BR 31		
% em peso	A	B	Δ	A	B	Δ
+4,76	0,93	5,15	n.i.	0,00	0,01	
-4,76 +2,38	21,10	21,07	0,14	18,05	0,86	95,24
-2,38 +2,00	9,19	6,94	24,48	11,32	3,95	65,11
-2,00 +1,41	8,99	7,61	15,35	10,48	9,44	9,92
-1,41 +0,59	23,64	19,05	19,42	21,94	26,34	-20,05
-0,59 +0,25	16,37	14,56	11,06	12,90	19,34	-49,92
-0,25 +0,15	5,96	5,77	3,19	6,44	10,00	-55,28
-0,15 +0,074	5,13	11,31	n.i.	6,62	14,07	-112,54
-0,074	8,69	8,54	1,73	12,25	15,99	-30,53

A= amostragem instantânea; B= amostragem intensiva; Δ = variação (%); n.i.=não indicado

FIGURA 6.12 - Variação da granulometria, segundo tipo de amostragem

A confiabilidade é maior na amostragem intensiva, pois há coleta de material considerando a sua variação ao longo de um dia inteiro, sendo, portanto, mais representativa. Verificou-se que os ensaios estavam dentro das variações esperadas para o material da pedreira BR17 e manteve a reprodutibilidade dentro do aceitável. No caso do material da pedreira BR31, os resultados das duas amostragens realizadas foram bastante distintos, o que sugere uma oscilação nas operações de beneficiamento, intencionais ou não. Cabe ressaltar que esta é a mineração que está alterou as instalações de beneficiamento, para converter a produção de pó de pedra e de areia de brita.

Desta forma, fica bastante evidente que a amostragem intensiva apresenta melhor representatividade do material a ser caracterizado granulometricamente e mesmo em outros ensaios, não sendo tão crítica para operações de beneficiamento mais rotineiras.

6.2.1.3. Análise visual dos resíduos

A análise visual dos resíduos é apresentada a seguir, nas **FOTOS 6.33 a 6.45**. As imagens foram tiradas do pó de pedra, sem nenhuma lavagem do material. A análise das frações (**FOTOS 6.46 a 6.60**) permitiu verificar alguns aspectos morfológicos e mineralógicos adicionais.

FOTO 6.33 - Pó de pedra (BR06)

FOTO 6.34 - Pó de Pedra (BR08)

FOTO 6.35 - Pó de pedra (BR10)

FOTO 6.36 - Pó de pedra (BR12)

FOTO 6.37 - Pó de pedra (BR17)

FOTO 6.38 - Pó de pedra (BR19)

FOTO 6.39 - Pó de pedra (BR21)

FOTO 6.40 - Pó de pedra (BR26)

FOTO 6.41 - Pó de pedra (BR28)

FOTO 6.42 - Pó de pedra (BR29)

FOTO 6.43 - Pó de pedra (BR30)

FOTO 6.44 - Pó de pedra (BR31)

FOTO 6.45 - Pó de pedra (BR34)

Esta análise procurou, essencialmente, observar alguns aspectos de forma, angulosidade, arredondamento e textura superficial (rugosidade). De um modo geral, os resíduos de mineração de brita apresentam alta rugosidade das partículas e grande aderência das menores às maiores (**FOTOS 6.35, 6.42, 6.44**). O arredondamento é baixo, decorrente do processo mecânico de quebra das partículas durante a britagem e os fragmentos apresentam angulosidade proeminente (**FOTOS**

6.37, 6.34, 6.39). A esfericidade é maior em alguns casos (FOTOS 6.45, 6.33), chegando a evidenciar forma cúbica de partículas, sendo que , na maioria, as formas são mais prismáticas a tabulares (FOTOS 6.39, 6.43, 6.42). O fator determinante para a forma das partículas é o tipo de britador utilizado pela mineração, sendo pouco associado o tipo de rocha-fonte .

• Fração +2,0 mm

Algumas amostras ficam mais fáceis de serem observadas com a sua separação em frações granulométricas, que dá um aspecto visual menos poluído. A fração +2,0 mm é constituída, principalmente, de fragmentos de rochas (agregados minerais), com poucos grãos de quartzo e feldspato liberados, que quando ocorrem, são fenocristais. As amostras BR12 (FOTO 6.46), BR16 (FOTO 6.47) e BR17 (FOTO 6.48) apresentam formas mais prismáticas e tabulares, enquanto que nas amostras BR29 (FOTO 6.49) e BR31(FOTO 6.50) apresentam-se mais cúbicas. O arredondamento é baixo para todas as amostras, com angulosidade proeminente.

FOTO 6.46 - Fração +2,0 mm (BR12)

FOTO 6.47 - Fração +2,0 mm (BR16)

FOTO 6.48 - Fração +2,0 mm (BR17)

FOTO 6.49 - Fração +2,0 mm (BR29)

FOTO 6.50 - Fração +2,0 mm (BR31)

• **Fração -2,0 mm +0,6 mm**

Para esta fração, observou-se que os grãos de quartzo/feldspato e máficos são liberados em maior quantidade, e que ainda estão presentes também como fragmentos de rocha. Nota-se a presença de partículas finas, normalmente aderidas à rugosidade dos grãos maiores (**FOTOS 6.51, 6.53 e 6.54**), que se deve ao peneiramento feito a seco em laboratório. Nas amostras BR16 (**FOTO 6.52**) e BR31(**FOTO 6.55**), os finos foram eliminados no peneiramento a úmido. Quanto à forma, a predominância é para as partículas prismáticas e tabulares, mesmo nos casos em que eram cúbicas nas frações +2,0 mm (**FOTOS 6.54 e 6.55**). A angulosidade é marcante, com baixo arredondamento.

FOTO 6.51 - Fração -2,0 mm +0,6 mm(BR12)

FOTO 6.52 - Fração -2,0 mm +0,6 mm (BR16)

FOTO 6.53 - Fração -2,0 mm +0,6 mm (BR17)

FOTO 6.54 - Fração -2,0 mm +0,6 mm (BR29)

FOTO 6.55 - Fração -2,0 mm +0,6 mm (BR31)

• Fração -0,6 mm +0,074 mm

A principal característica observada nesta fração, foi a concentração diferencial dos minerais, de acordo com a coloração, bem como o arredondamento e esfericidade. Para as amostras das minerações BR12 (**FOTO 6.56**) e BR31 (**FOTO 6.60**), nota-se que aumentou o arredondamento das partículas em relação às frações maiores, e a maior presença foi de minerais claros (félsicos), quartzo e feldspato. Nos outros casos, ainda observa-se a predominância de grãos angulosos (**FOTOS 6.57, 6.58 e 6.59**). A concentração de minerais máficos ficou mais evidente na amostra da mineração BR 29 (**FOTO 6.59**). Nesta fração, a maioria dos grãos já se apresentam totalmente liberados.

FOTO 6.56 - Fração +0,6 mm -0,074 mm (BR12)

FOTO 6.57 - Fração +0,6 mm -0,074 mm (BR16)

FOTO 6.58 - Fração +0,6 mm -0,074 mm (BR17)

FOTO 6.59 - Fração +0,6 mm -0,074 mm (BR29)

FOTO 6.60 - Fração +0,6 mm -0,074 mm (BR31)

6.2.1.4. Análises Químicas

As composições químicas obtidas encontram-se na **TABELA 6.14**.

TABELA 6.14 – Composição química dos resíduos de mineração de brita

ÓXIDO (% em peso)	BR06	BR08	BR10	BR12	BR16	BR17	BR19	BR21	BR26	BR28	BR29	BR30	BR31	BR34
SiO ₂	66,00	68,10	69,70	71,01	65,30	66,98	68,00	71,00	67,00	58,90	64,93	62,30	72,00	67,20
Al ₂ O ₃	14,90	14,20	14,50	13,36	15,60	14,08	14,90	14,00	15,00	15,20	13,98	15,30	14,40	13,80
Na ₂ O	4,00	3,55	3,60	2,64	2,75	3,04	3,74	3,09	3,99	4,23	2,85	3,84	4,35	3,29
K ₂ O	4,22	4,31	4,69	4,64	5,02	4,92	4,59	5,46	5,13	4,21	4,81	4,56	3,69	4,51
CaO	2,98	1,82	2,02	2,08	2,39	3,01	2,44	1,34	2,73	4,26	3,33	4,03	1,81	2,49
MgO	1,35	0,73	0,89	0,93	1,40	1,42	0,79	0,36	1,38	2,90	2,18	2,43	0,30	1,40
Fe ₂ O ₃	4,29	2,93	3,15	3,13	4,07	4,00	3,22	2,45	4,30	6,39	5,30	5,52	1,90	3,06
TiO ₂	0,77	0,48	0,57	0,59	0,76	0,71	0,49	0,26	0,75	1,22	0,95	0,89	0,19	0,56
P ₂ O ₅	0,26	0,16	0,19	0,08	0,40	0,17	0,19	0,08	0,28	0,49	0,16	0,35	0,05	0,18
P.F.	1,14	-	0,28	1,09	1,86	1,21	1,42	1,29	-	1,30	0,97	-	1,01	0,65

É possível notar, pelos valores apresentados, que os materiais apresentaram variada composição química, com os teores de SiO₂ entre 58,9 e 72,0 % (média = 67,03 %, desvio padrão = 3,54), teores de Al₂O₃ de 13,8 a 15,6 % (média = 14,52 %, desvio padrão = 0,65), teores de álcalis (CaO + Na₂O + K₂O) variando de 9,69 a 12,7 % (média = 10,75 %, desvio padrão = 1,02), e teores de Fe₂O₃ + TiO₂ entre 2,09 e 7,61 (média = 4,49 % e desvio padrão = 1,52).

Na **FIGURA 6.13** é observa-se que os teores de Fe₂O₃+TiO₂ têm uma diminuição linear com o aumento de SiO₂, em uma nítida correlação inversa.

FIGURA 6.13 - Relação entre os teores de Fe₂O₃ + TiO₂ e os teores de SiO₂

A correlação entre os teores de Fe_2O_3 e o índice de máficos (**FIGURA 6.14**) apenas uma tendência difusa, semelhante ao comportamento entre os finos menores que 0,074 mm e o mesmo índice.

FIGURA 6.14 - Relação entre os teores de Fe_2O_3 e o Índice de máficos
(Granitos A = textura fanerítica média; Granitos B = porfíricos com matriz média,
Granitos C = porfíricos com matriz fina)

Os resíduos de gnaisses se destacam por apresentarem maiores teores de Fe_2O_3 (entre 4 e 6,5 %) e IM = 35. Dentre os granitos, os que possuem textura fanerítica média se concentram em IM = 10 e teores de ferro entre 1,9 e 3,1 %. Aqueles com textura porfírica e matriz média possuem teores de Fe_2O_3 entre 3 e 4% e IM = 25 %. Já os granitos porfíricos com matriz fina estão com IM entre 15 e 25 e teores entre 3 e 5,3 %.

Pode-se verificar a qualidade e reprodutibilidade dos resultados de análises químicas com materiais coletados por amostragem instantânea e intensiva (**TABELA 6.15**), pelo cálculo do índice de variação, cujos resultados foram considerados aceitáveis.

TABELA 6.15 – Variação da composição química, segundo amostragem

Óxido (% em peso)	BR 17		
	A	B	Δ
SiO ₂	67,50	66,98	0,77
Al ₂ O ₃	15,10	14,08	6,75
Na ₂ O	4,04	3,04	24,75
K ₂ O	4,74	4,92	3,80
CaO	2,50	3,01	20,40
MgO	1,07	1,42	32,71
Fe ₂ O ₃	3,59	4,00	11,42
TiO ₂	0,60	0,71	18,33
P ₂ O ₅	0,21	0,17	19,05
P.F.	0,95	1,21	27,37

A= amostragem instantânea; B= amostragem intensiva; Δ = variação (%)

Na TABELA 6.16 podem ser observados os resultados das análises dos resíduos classificados segundo frações granulométricas de interesse, nas indústrias de aplicação vislumbradas.

TABELA 6.16 – Composição química nas frações granulométricas de interesse

CÓD	Fração (mm)	Teores (% em peso)											
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	MnO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	P.F.	Outros
BR12	+2,0	69,3	14,4	3,08	5,22	2,35	1,00	0,05	2,70	0,56	<0,01	0,88	0,39
	-2,0 +0,59	71,2	13,0	2,85	4,57	1,95	0,75	0,05	2,94	0,56	0,26	1,50	0,41
	-0,59 +0,074	72,5	12,6	2,75	4,31	1,87	0,96	0,05	3,32	0,56	<0,01	0,75	0,41
	-0,074	67,8	15,6	-	4,84	2,91	1,37	0,08	4,17	0,96	<0,01	1,66	0,62
BR16	+2,0	67,5	14,4	3,06	4,69	2,51	1,83	0,03	3,37	0,54	0,26	1,62	0,52
	-2,0 +0,59	68,5	14,1	3,20	4,67	2,32	1,52	0,04	3,02	0,51	0,25	1,29	0,60
	-0,59 +0,074	67,4	13,3	2,80	4,63	2,41	2,42	0,07	4,15	0,68	0,35	1,30	0,49
	-0,074	60,0	14,1	2,69	4,39	4,21	2,84	0,08	6,28	1,31	0,99	2,46	0,56
BR17	+2,0	65,8	15,3	3,40	5,27	3,04	1,22	0,05	3,66	0,66	<0,10	1,21	0,49
	-2,0 +0,59	67,6	14,2	3,08	4,83	2,95	1,23	0,04	3,59	0,61	<0,10	1,32	0,57
	-0,59 +0,074	69,1	12,9	2,75	4,70	2,71	1,47	0,06	4,13	0,71	<0,10	0,99	0,64
	-0,074	61,8	13,3	2,54	4,70	4,19	2,65	0,07	6,17	1,27	0,96	1,71	0,60
BR29	+2,0	65,0	15,3	3,05	5,76	3,11	1,74	0,05	4,00	0,70	<0,01	0,79	0,54
	-2,0 +0,59	66,0	14,4	2,91	5,20	2,83	2,13	0,06	4,08	0,74	0,32	0,84	0,50
	-0,59 +0,074	65,5	12,5	2,61	3,91	3,68	2,18	0,09	6,77	1,24	<0,01	1,09	0,46
	-0,074	59,4	14,1	2,92	3,97	3,98	4,02	0,09	7,27	1,20	0,99	1,47	0,55
BR31	+2,0	67,8	16,2	3,41	5,10	2,46	0,62	0,03	1,80	0,20	<0,01	1,79	0,60
	-2,0 +0,59	68,7	15,6	3,71	4,60	2,00	0,48	0,04	1,90	0,19	<0,01	2,02	0,72
	-0,59 +0,074	76,2	10,8	2,72	3,21	1,64	0,48	0,03	1,86	0,17	0,06	1,75	1,06
	-0,074	64,7	17,6	2,01	5,98	2,51	0,81	0,06	2,63	0,25	<0,01	2,78	0,62

Analisando os resultados obtidos, pode-se notar que o comportamento de alguns elementos químicos tem a mesma tendência nas diferentes amostras. O teor de SiO₂ (FIGURA 6.15), por exemplo, aumenta das frações maiores para as intermediárias, e decresce na fração mais fina.

Isto se dá devido ao comportamento dos minerais durante o beneficiamento, com composição química sendo consequência das variações de granulometria original e resistência / dureza dos minerais. Assim, das frações mais grossas para as mais finas, há principalmente liberação dos grãos maiores da rocha (fenocristais), seguido do quartzo, presente nos pórfiros e na matriz, e nos finos concentram-se dos máficos. No caso do resíduo da pedreira BR16, nota-se comportamento diferente por se tratar de areia de brita, com beneficiamento a úmido.

Os teores de Fe_2O_3 (FIGURA 6.16) e TiO_2 (FIGURA 6.17) aumentam a medida que diminui a granulometria. As amostras que se situam nos extremos em teores de SiO_2 , apresentam comportamento inverso para Fe_2O_3 : nas frações onde há maiores teores do primeiro elemento, a amostra é empobrecida no segundo, e vice-versa, exemplificado pelos resíduos das pedreiras BR12 e BR29. Para o caso da BR29, observa-se ainda um pico na fração $-0,59 + 0,074 \text{ mm}$, o que pode representar a concentração de minerais acessórios (titanita / ilmenita).

O MgO apresenta comportamento irregular (FIGURA 6.18), mas sempre com maiores teores na fração mais fina, evidenciando o aumento de máficos (biotita e piroxênio/anfibólio) nesta porção. Os teores de Al_2O_3 e de álcalis, que se reportam a várias espécies minerais, não apresentam grande variação e não indicam nenhuma tendência de concentração.

FIGURA 6.15 - Relação entre os teores (% em peso) de SiO_2 e as frações granulométricas de interesse

FIGURA 6.16 - Relação entre os teores (% em peso) de Fe_2O_3 e as frações granulométricas de interesse

FIGURA 6.17 - Relação entre os teores (% em peso) de TiO_2 e as frações granulométricas de interesse

FIGURA 6.18 - Relação entre os teores (% em peso) de MgO e as frações granulométricas de interesse

6.2.1.5. Análises Mineralógicas

Foram realizadas análises para a identificação da assembléia mineralógica nas frações de interesse. Na TABELA 6.17 são apresentados os resultados.

TABELA 6.17 – Composição mineralógica dos resíduos de mineração de brita

COD.	Frações	Mineralogia
BR12	+2,0 mm	Quartzo, K Feldspato (Microclínio), Plagioclásio, Biotita, Calcopirita (p.p.)
	-2,0 +0,59 mm	Quartzo, K Feldspato (Microclínio), Plagioclásio, Biotita, Muscovita, Calcopirita (p.p.)
	-0,59 +0,074 mm	Quartzo, K Feldspato (Microclínio), Plagioclásio, Biotita, Calcopirita (p.p.)
	-0,074 mm	Quartzo, K Feldspato (Microclínio), Plagioclásio, Biotita, Clorita, Illita (p.p.), Calcopirita (p.p.), Aenigmatita (p.p.)
BR16	+2,0 mm	Quartzo, K Feldspato (Microclínio), Plagioclásio, Piroxênio, Biotita, Muscovita
	-2,0 +0,59 mm	Quartzo, K Feldspato (Microclínio e Ortoclásio), Plagioclásio, Piroxênio, Biotita, Muscovita, Flogopita, Clorita, Vermiculita
	-0,59 +0,074 mm	Quartzo, K Feldspato (Microclínio) e K Feldspato (Ortoclásio - p.p.), Plagioclásio, Piroxênio, Biotita, Flogopita, Clorita, Caolinita, Manganocalcita (p.p.)
	-0,074 mm	Quartzo, K Feldspato (Ortoclásio), Plagioclásio, Piroxênio, Biotita, Flogopita, Caolinita
BR17	+2,0 mm	Quartzo, K Feldspato (Microclínio), Plagioclásio, Flogopita, Anfibólio, Piroxênio (p.p.), Clorita (p.p.)
	-2,0 +0,59 mm	Quartzo, K Feldspato (Microclínio), Plagioclásio, Flogopita, Anfibólio, Piroxênio (p.p.), Clorita (p.p.)
	-0,59 +0,074 mm	Quartzo, K Feldspato (Microclínio), Plagioclásio, Flogopita, Anfibólio, Clorita
	-0,074 mm	Quartzo, K Feldspato (Microclínio) e K Feldspato (Ortoclásio - p.p.), Plagioclásio, Flogopita, Anfibólio, Clorita (p.p.), Magnesiochloritóide (p.p.), Illita-Montmorillonita (p.p.)
BR29	+2,0 mm	Quartzo, K Feldspato (Microclínio) Plagioclásio, Piroxênio, Biotita, Flogopita (p.p.), Crossita (p.p.)
	-2,0 +0,59 mm	Quartzo, K Feldspato (Ortoclásio), Plagioclásio, Biotita, Flogopita (p.p.), Piroxênio, Anfibólio (p.p.), Crossita
	-0,59 +0,074 mm	Quartzo, K Feldspato (Microclínio), Plagioclásio, Biotita, Flogopita (p.p.), Piroxênio, Anfibólio, Crossita (p.p.)
	-0,074 mm	Quartzo, K Feldspato (Microclínio) e K Feldspato (Ortoclásio - p.p.), Plagioclásio, Biotita, Clorita (p.p.), Piroxênio, Anfibólio (p.p.)
BR31	+2,0 mm	Quartzo, K Feldspato (Microclínio), Plagioclásio, Biotita e Muscovita
	-2,0 +0,59 mm	Quartzo, K Feldspato (Microclínio), Plagioclásio, Muscovita, Flogopita (p.p.), Clorita (p.p.)
	-0,59 +0,074 mm	Quartzo, K Feldspato (Microclínio e Sanidina), Plagioclásio, Muscovita (p.p.) Flogopita, Biotita (p.p.), Joaquinita (p.p.)
	-0,074 mm	Quartzo, K Feldspato (Microclínio), Plagioclásio, Muscovita, Flogopita (p.p.), Clorita (p.p.)

(p.p. = possível presença)

Os minerais identificados foram reunidos em grandes grupos mineralógicos e foi feita uma avaliação da concentração dos minerais nas frações de interesse, a partir dos difratogramas obtidos (FIGURA 6.19 a 6.23).

Os grupos mineralógicos são:

M = micas (biotita, muscovita e flogopita)

K = argilominerais (caulinita, vermiculita, illita, montmorillonita)

F = Feldspatos (K-feldspato e plagioclásio)

Q = quartzo

C = clorita

A = anfibólios

P = piroxênios

Esta avaliação fornece dados quantitativos relativos pela comparação entre os picos dos principais minerais, uma vez que o método de Difração de Raios-X é um método qualitativo e não quantitativo.

LEGENDA DOS GRÁFICOS

Picos relativos a padrões de minerais
M = micas
K = argilominerais
F = feldspatos
Q = quartzo
C = clorita
A = anfíbólio

FIGURA 6.19 - Difratoograma 3D nas frações de interesse à aplicação industrial - BR12

LEGENDA DOS GRÁFICOS

Picos relativos a padrões de minerais
M = micas
K = argilominerais
F = feldspatos
Q = quartzo
P = piroxênio

FIGURA 6.20 - Difratoograma 3D nas frações de interesse à aplicação industrial - BR16

LEGENDA DOS GRÁFICOS

Picos relativos a padrões de minerais

- M = micas
- K = argilominerais
- F = feldspatos
- Q = quartzo
- C = clorita
- A = anfibólio

FIGURA 6.21 - Difratoograma 3D nas frações de interesse à aplicação industrial - BR17

LEGENDA DOS GRÁFICOS

Picos relativos a padrões de minerais

- M = micas
- K = argilominerais
- F = feldspatos
- Q = quartzo
- A = anfibólio

FIGURA 6.22 - Difratoograma 3D nas frações de interesse à aplicação industrial - BR29

LEGENDA DOS GRÁFICOS

Picos relativos a padrões de minerais

- M = micas
- C = clorita
- F = feldspatos
- Q = quartzo

FIGURA 6.23 - Difratoograma 3D nas frações de interesse à aplicação industrial - BR31

Procurou-se verificar a concentração de minerais micáceos e argilominerais nas frações mais finas ($-0,074$ mm). Nos resíduos das pedreiras BR12 (**FIGURA 6.19**) e BR31 (**FIGURA 6.23**) esta tendência é bem marcante, com o aumento dos picos característicos dos minerais micáceos na fração $-0,074$ em relação às outras, e decréscimo relativo de quartzo e feldspato. Nos resíduos das pedreiras BR16 (**FIGURA 6.20**) e BR17 (**FIGURA 6.21**), a fração que concentra os micáceos é a $-0,6+0,074$ mm. Na BR29 (**FIGURA 6.22**) observa-se maior quantidade relativa de micas nas frações abaixo de $2,0$ mm.

Os principais picos das micas não refletem diretamente os altos teores de ferro, possivelmente devido a associação biotita + muscovita + flogopita. A BR16 ilustra bem este caso, pois o teor de ferro correspondente ao maior pico de micas na fração $-0,6 +0,074$ mm é menor que a fração $-0,074$ mm.

Cabe ainda destacar que o limite de detecção deste método analítico, que habilita à identificação de minerais maiores constituintes, não detecta os minerais que ocorrem em quantidades menores em assembléias complexas. Também foram verificadas algumas diferenças entre os minerais descritos pela microscopia óptica e a difração de raios-X, resultantes das características analíticas e descritivas de cada método de identificação mineralógica.

6.2.2. Mineração de areia

Após a apresentação e discussão dos resultados obtidos para os resíduos de mineração de brita, percebe-se que não existe a mesma consistência para os resíduos de mineração de areia, pela menor quantidade de dados obtidos. Esta diferenciação é conseqüente de uma série de fatores já mencionados, causadores da desproporção no estudo feito para os dois tipos de resíduos.

Na seqüência são apresentados e discutidos os dados obtidos a partir dos ensaios de caracterização tecnológica realizados com os resíduos de mineração de areia.

6.2.2.1. Classificação Granulométrica

Os resultados obtidos encontram-se na **TABELA 6.18**. As curvas granulométricas podem ser visualizadas na **FIGURA 6.24**.

TABELA 6.18 – Resultados dos ensaios granulométricos dos finos de areia

<i>Fração</i> (mm)	<i>AR 01</i>	<i>AR06</i>	<i>AR 14</i>	<i>AR 16</i>	<i>AR 25</i>	<i>AR42c</i>	<i>AR42g</i>
	(% em peso)						
+0,16	11,13	3,89	0,00	0,07	0,20	16,41	3,66
-0,16+0,076	38,53	15,72	1,56	9,11	3,45	45,86	17,38
- 0,076 +0,048	18,27	10,40	6,69	9,14	5,73	16,04	13,27
-0,048 +0,035	9,92	7,87	8,10	6,82	6,05	8,03	9,42
-0,035 +0,022	10,36	12,25	15,13	9,62	11,31	8,16	12,55
-0,022 +0,010	10,09	20,13	24,55	14,62	21,04	8,18	15,82
-0,010	12,83	33,63	43,97	50,69	52,42	13,73	31,56

FIGURA 6.24 - Curvas granulométricas dos finos de areia

Nota-se que os finos de mineração de areia podem ser separados em dois grupos, com base em seu comportamento granulométrico: aqueles que apresentam mais de 35 % retidos na fração 0,076 mm e menos de 15 % abaixo de 0,01 mm, e os demais. Tal comportamento reflete diretamente o tipo de mineração e beneficiamento: o primeiro grupo é onde há extração de areia a partir do manto de alteração, com beneficiamento por classificação em caixas de decantação (AR42c e AR01).

Os casos que apresentam menos de 10 % em peso retido em 0,076 mm e mais de 44 % passante em de 0,01 mm são minerações de areia a partir de rochas sedimentares (AR16 e AR25), e podem ser separados como um grupo. Neste se insere, ainda, a AR14, que apesar de a rocha-fonte ser derivada de manto de alteração, a mineração faz a classificação com auxílio de hidrociclones, que estão ajustados para o corte em 0,15 mm. Nas minerações AR06 e AR42g também há classificação por ciclonagem, mas o corte feito não é tão preciso, além de terem um pouco menos de material abaixo de 0,01 mm (31 a 34 %)

Tais resultados são bastante sugestivos de que as curvas granulométricas indicam diretamente o tipo de mineração e beneficiamento, para o universo das minerações amostradas. Ressalte-se, porém que se trata de uma parte reduzida do total da minerações de areia da RMSP, não habilitando a generalizações.

Para uma das amostras foi realizado o controle de método de amostragem, com confronto de dados de granulometria para amostragem instantânea e intensiva. As diferenças podem ser verificadas na **TABELA 6.19** e na **FIGURA 6.25**.

TABELA 6.19 – Variação da granulometria, segundo tipo de amostragem

Fração (mm)	AR 25		
(% em peso)	A	B	Δ
+0,076	2,86	3,45	20,63
- 0,076 +0,048	6,57	5,73	12,79
-0,048 +0,035	6,94	6,05	12,82
-0,035 +0,022	12,33	11,31	8,27
-0,022 +0,010	20,77	21,04	1,30
-0,010	50,53	52,42	3,74

A= amostragem instantânea; B= amostragem intensiva; Δ = variação (%)

FIGURA 6.25 - Variação da granulometria, segundo tipo de amostragem

Também para os resíduos de mineração de areia a confiabilidade da amostragem é maior naquela realizada intensivamente, com melhor representatividade do material a ser caracterizado. Verificou-se que para o ensaio realizado no material residual da mineração AR25 manteve uma excelente reprodutibilidade.

6.2.2.2. Análises Químicas

Os resultados das análises químicas dos resíduos estudados se encontram na TABELA 6.20.

TABELA 6.20 – Composição química dos resíduos de mineração de areia

ÓXIDO (% em peso)	AR01	AR06	AR14	AR16	AR25	AR42c	AR42g
SiO ₂	50,40	48,50	60,10	52,00	50,60	54,90	45,90
Al ₂ O ₃	26,10	28,30	23,70	31,20	24,70	26,60	31,90
Na ₂ O	0,95	0,48	0,15	<<	0,16	0,23	0,08
K ₂ O	3,65	3,45	5,31	1,61	2,27	4,42	2,06
CaO	0,18	0,47	0,11	0,09	0,63	0,06	0,07
MgO	1,89	1,27	0,37	0,18	0,93	0,19	0,11
MnO	0,07	0,07	0,04	0,02	0,02	0,07	0,07
Fe ₂ O ₃	5,16	4,69	4,10	1,97	6,68	3,43	3,48
TiO ₂	1,56	0,79	0,84	0,79	0,97	0,26	0,23
P ₂ O ₅	0,25	0,22	0,11	0,08	0,19	0,07	0,10
P.F.	8,36	11,30	4,38	12,00	12,40	9,39	15,80

<< = traços

É possível notar grande variação de composição química nos materiais analisados, com os teores de SiO₂ de 45,9 a 60,1 % (média = 51,28 %, desvio padrão = 4,20), teores de Al₂O₃ entre 23,7 e 31,9 % (média = 27,13 %, desvio padrão = 2,89), teores de álcalis (CaO + Na₂O + K₂O) variando de 1,70 a 5,57 % (média = 3,61 %, desvio padrão = 1,43), e teores de Fe₂O₃ + TiO₂ entre 2,76 e 8,04 (média = 5,38 % e desvio padrão = 1,96).

Na FIGURA 6.26, de correlação entre teores, é possível observar aumento dos teores de Fe₂O₃ + TiO₂ com o aumento de SiO₂ em duas suaves tendências, com teor limítrofe é 52 % para SiO₂. Para os teores de SiO₂ e Al₂O₃ (FIGURA 6.27), verificou-se correlação inversa também com as mesmas tendências separáveis pelo limite de 52 % de SiO₂, mas em ambos os casos não se verificou relação deste comportamento com o tipo de mineração.

FIGURA 6.26 - Relação entre os teores de $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ e os teores de SiO_2

FIGURA 6.27 - Relação entre os teores de Al_2O_3 e os teores de SiO_2

Foi também realizado para estes resíduos o controle da reprodutibilidade dos resultados de análises químicas realizados com materiais coletados durante a amostragem instantânea e intensiva, listados na **TABELA 6.21**. As diferenças entre

os resultados são aceitáveis, e podem ser resultantes de várias interferências além do tipo de coleta de amostra, tal como diferença das características da frente de lavra, oscilações na alimentação do beneficiamento, dentre outras.

TABELA 6.21 – Variação da composição química, segundo amostragem

ÓXIDO (% em peso)	AR25		
	A	B	Δ
SiO ₂	47,80	50,60	5,86
Al ₂ O ₃	24,50	24,70	0,82
Na ₂ O	0,07	0,16	n.i.
K ₂ O	1,97	2,27	15,23
CaO	0,39	0,63	61,54
MgO	0,73	0,93	27,40
MnO	0,02	0,02	0,00
Fe ₂ O ₃	7,08	6,68	5,65
TiO ₂	0,99	0,97	2,02
P ₂ O ₅	0,07	0,19	n.i.
P.F.	15,90	12,40	22,01

A= amostragem instantânea; B= amostragem intensiva; Δ = variação (%); n.i.=não indicado

Apenas um dos resíduos (AR42c) precisou ser classificado e separado granulometricamente, de forma a atender as especificações das indústrias de aplicação vislumbradas. Os demais materiais mostraram-se adequados para as aplicações.

Na TABELA 6.22 podem ser observados os resultados das análises feitas nas frações de interesse dos resíduos da mineração de areia AR42c.

TABELA 6.22 – Composição química, por fração granulométrica de interesse

ÓXIDO (% em peso)	AR42c				
	Total 100 %	+0,074 mm 47 %	-0,074 mm 53 %	recomposição 100 %	Δ
SiO ₂	54,9	62,0	49,4	55,32	0,77
Al ₂ O ₃	26,6	21,2	31,2	26,50	0,38
Na ₂ O	0,23	0,40	0,07	0,23	0,00
K ₂ O	4,42	6,28	2,63	4,35	1,58
CaO	0,06	0,20	0,08	0,14	n.i.
MgO	0,19	0,50	0,22	0,35	84,21
MnO	0,07	0,08	0,07	0,07	0,00
Fe ₂ O ₃	3,43	3,28	3,71	3,51	2,33
TiO ₂	0,26	0,28	0,33	0,31	19,23
P ₂ O ₅	0,07	0,06	0,08	0,07	0,00
P.F.	9,39	5,50	11,9	8,89	5,32

Δ = variação (%); n.i.=não indicado

A fração abaixo de 0,074 mm representa 53 % do total da amostra, e verifica-se que a análise química por fração, quando composta para a amostra total indica a

precisão adequada, com variações de valores dentro de padrões aceitáveis (< 10 % relativos).

6.2.2.3. Análises Mineralógicas

Foram realizadas análises para a identificação da assembléia mineralógica nas frações de interesse. Na TABELA 6.23 são apresentados os resultados.

TABELA 6.23 – Composição mineralógica dos resíduos de mineração de areia

CÓD		Mineralogia
AR06		Quartzo, K Feldspato (Microclínio), Plagioclásio, Muscovita, Biotita, Caulinita, Nordstrandita (p.p.)
AR25		Quartzo, K Feldspato (Microclínio e Ortoclásio), Muscovita, Caulinita, Dyxeita (p.p.)
AR42c (total)		Quartzo, K Feldspato (Microclínio), Muscovita, Flogopita, Caulinita, Nordstrandita (p.p.)
AR42c	+0,074 mm	Quartzo, K Feldspato (Microclínio), Muscovita, Flogopita, Caulinita, Nimita (p.p.), Anortoclásio (p.p.), Hidrobiotita (p.p.)
	-0,074 mm	Quartzo, K Feldspato (Microclínio), Muscovita, Flogopita, Piroxênio, Caulinita, Brucita (p.p.), Anortoclásio, Hidrobiotita, Jacobsita (p.p.)
AR42g		Quartzo, K Feldspato (Microclínio), Muscovita, Caulinita, Dyxeita (p.p.)

(p.p. = possível presença)

Os minerais encontrados foram agrupados em grandes grupos (FIGURAS 6.28 e 6.29). Os grupos mineralógicos são:

M = micas (biotita, muscovita e flogopita)

K = argilominerais

F = Feldspatos (K-feldspato e plagioclásio)

Q = quartzo

LEGENDA DOS GRÁFICOS

Picos relativos a padrões de minerais
M = micas
K = argilominerais
F = feldspatos
Q = quartzo

FIGURA 6.28 - Difrátograma 3D das areias estudadas

A mineralogia básica dos resíduos é quartzo-feldspática, com pouca quantidade de micas e presença em proporções variadas de argilo-minerais(caolinita, illita).

A AR42c, na fração +0,074 mm, pode ser considerada uma areia feldspática com quantidades importantes de muscovita e flogopita. A caolinita ocorre associada a grãos de feldspato intemperizado. Na fração mais fina ocorre um decréscimo de feldspatos e muscovita e aumento da proporção de caolinita.

FIGURA 6.29 – Difrátograma 3D nas frações de interesse à aplicação industrial - AR42c

CAPÍTULO 7 - APLICAÇÃO DOS RESÍDUOS

7. APLICAÇÃO DOS RESÍDUOS

Uma vez apresentados e discutidos os resultados da caracterização tecnológica dos resíduos, neste capítulo serão enfocados os materiais e frações granulométricas que podem interessar às indústrias de aplicação como potenciais fontes de matéria-prima. Inicialmente procurou-se levantar algumas das definições e especificações requeridas nos setores que são os potenciais alvos consumidores destes materiais, dados estes que nortearam os estudos tecnológicos específicos.

Optou-se por utilizar os resíduos *in natura*, sem qualquer separação mineral, de forma a estimular a aplicação dos resultados desta pesquisa pelos mineradores de agregados da RMSP. Futuramente, os resíduos poderão ser usados como aditivos em massas, ou ainda como contribuintes de álcalis, corretores granulométricos, redutores de plasticidade, dentre outras funções potenciais. A sua aplicação é dependente, em alguns casos, da separação de elementos não interessantes às indústrias, tais como excessiva quantidade de finos ou altos teores de ferro.

Foi objetivo precípuo desta pesquisa verificar a potencialidade de aplicação destes resíduos nos Setores da Indústria Cerâmica, do Vidro e Construção Civil / Pavimentação. Os itens a seguir apresentam uma avaliação dos resultados obtidos já voltada para a aplicação nestes setores industriais.

7.1. INDÚSTRIA CERÂMICA

A Cerâmica é um campo especial da ciência dos materiais, que pode ser definida segundo vários critérios. De acordo com a American Ceramic Society (In: SOUZA SANTOS 1989), cerâmicas ou materiais cerâmicos compreendem todos os materiais de emprego em engenharia ou produtos químicos inorgânicos, excetuados os metais e suas ligas, que ficam utilizáveis geralmente pelo tratamento em temperatura elevadas. NORTON (1973, *apud* GREGO 1998) adota o critério genético da palavra cerâmica - que é proveniente do grego e significa "coisa queimada" - e inclui nesta classe a cerâmica vermelha, branca, esmaltes, refratários, vidros, cimentos e abrasivos. A definição adotada atualmente pela Associação Brasileira de Cerâmica considera a cerâmica como *a arte, ciência e tecnologia de*

fabricar e usar peças sólidas, as quais tem como componente essencial, ou são constituídas em grande parte, por materiais inorgânicos não metálicos, denominados materiais cerâmicos. Para classificar os materiais cerâmicos, optou-se, neste trabalho, por utilizar a subdivisão de ZANDONADI (1988 *apud* MOTTA 2000), que reúne os produtos cerâmicos em 8 grupos, baseados principalmente no tipo de utilização final (TABELA 7.1).

TABELA 7.1 - Classificação dos produtos cerâmicos

GRUPO	SETOR	PRODUTOS
1	Cerâmica estrutural ou vermelha	Tijolos, telhas, blocos, lajes, vasos ornamentais, agregados leves
2	Cerâmica branca	Grês sanitário, porcelanas (mesa e elétrica), faiança
3	Cerâmica de revestimento	Pisos, azulejos, grês porcelânico, ladrilhos, pastilhas, outros
4	Refratários	
5	Refratários isolantes	
6	Cerâmicas especiais	
7	Cimento	
8	Vidro	

Fonte: modificado de ZANDONADI (1998 *apud* MOTTA 2000)

Os setores de cerâmica vermelha, branca e de revestimento são também considerados cerâmicas tradicionais, e é para estes segmentos que são enfocados os usos potenciais dos resíduos. Apesar dos vidros estarem classificados como um dos setores cerâmicos, neste trabalho são considerados à parte (item 7.2), por se apresentarem como um segmento industrial de aplicação inteiramente separado.

Os materiais cerâmicos são fabricados a partir de matérias-primas naturais, beneficiadas e/ou sintéticas, com características controladas. Por meio de um processamento adequado, as propriedades dessas matérias-primas são alteradas nas suas composições químicas, estruturas cristalinas e nos arranjos das diversas fases componentes. Geralmente, pelo menos em uma das etapas do processamento os materiais são submetidos a temperaturas elevadas para que as propriedades úteis desejadas sejam desenvolvidas.

O processo de fabricação de produtos cerâmicos compreende, basicamente, quatro etapas essenciais (TABELA 7.2). Em alguns tipos de cerâmica, existe mais um processo, realizado após a queima, denominado esmaltação.

TABELA 7.2 – Etapas do processo de fabricação dos produtos cerâmicos

ETAPA	DESCRIÇÃO
Preparação das matérias-primas	Engloba a cominuição por meios mecânicos ou outros, fracionamento granulométrico por sedimentação, peneiramento ou outros, e mistura ou dispersão, para melhorar a relação das fases constituintes das partículas do sistema
Conformação (moldagem) e fabricação	Densificação, compactação e moldagem em peças de formas e dimensões desejáveis
Processamento térmico	Transformação em estrutura e composição pela aplicação de energia térmica, tais como secagem, queima, recozimento e fusão
Acabamento	Tratamento final para tornar a peça utilizável, que pode ser por cobertura, polimento e galvanoplastia

Fonte: SOUZA SANTOS (1989)

As matérias-primas cerâmicas podem ser classificadas como plásticas e não-plásticas. As matérias-primas plásticas são essenciais na fase de conformação e também exercem funções ao longo de todo o processo cerâmico; as não-plásticas atuam mais na fase de queima e como desplastificantes. As principais matérias-primas plásticas utilizadas na preparação das massas cerâmicas são: argilas fundentes (queima vermelha), argilas plásticas (queima branca ou clara) e caulim, e apresentam granulometria muito fina, com partículas abaixo $2\mu\text{m}$. Dentre as matérias-primas não-plásticas destacam-se areia, mica, óxidos de ferro, fundentes feldspáticos, carbonatos (calcário e dolomito), filito e talco, sendo que os dois últimos também possuem características plásticas. O quartzo (material não-plástico) geralmente já está incorporado a outras substâncias minerais (areia, argila, filito e fundentes feldspáticos) (MOTTA *et al.* 1998).

As argilas de granulometria muito fina apresentam boa plasticidade, mas precisam de uma considerável quantidade de água para desenvolver completamente esta característica. Apresentam alta resistência mecânica a seco e após a queima, alto grau de compactação, difícil perda d'água durante a secagem e podem sofrer fortes retrações diferenciais e deformações. Os redutores de plasticidade diminuem o grau de compactação da massa cerâmica, com redução da plasticidade das argilas e das contrações sofridas pela massa, tanto no processo de secagem quanto de queima.

A adição de matérias-primas não-plásticas reduz a interação das argilas com a água, causando pontos de descontinuidade nas forças de coesão entre as partículas, produzindo poros, que permitem a passagem da água e proporcionam uma melhor trabalhabilidade na massa. Um dos redutores de plasticidade mais utilizados é a areia, com granulometria entre 0,05 e 0,5 mm. (PRACIDELLI &

MELCHIADES 1997), sendo que a adição de 20 % de areia fina (grãos menores que 0,06 mm) e 10 % de areia grossa (grãos maiores que 0,06 mm) ocasiona redução na retração da secagem no processo cerâmico.

As informações sobre algumas especificações das matérias-primas da indústria cerâmica que serão apresentadas a seguir seguiram definições citadas em GREGO (1998) e MOTTA (2000)

Grupo 1 - Cerâmica estrutural ou vermelha

A massa usada em cerâmica estrutural é composta por argilas de diferentes plasticidades (gorda / magra), mineralogia ($\pm$ argilominerais / $\pm$ quartzo) e granulometria (argila / areia-silte), que conjuntamente propiciem boa trabalhabilidade e resistência mecânica, queimando preferencialmente na cor vermelha. Os constituintes minerais destas argilas são caulinita, illita, montmorilonita, vermiculita e cloritas; os outros minerais presentes são quartzo, mica, fragmentos de rocha, carbonatos, óxidos e hidróxidos de ferro, dentre outros. A presença de matéria orgânica aumenta a plasticidade e resistência mecânica a cru. Nestas argilas, são altos os teores de SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO e $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$. Dentre os fatores indesejáveis, por causarem retração, estão os altos teores de ferro, elementos alcalinos e alcalino-terrosos, os quais são responsáveis pela vitrificação. O ambiente de queima é oxidante, em temperaturas em torno de 900°C . Os fundentes estão presentes nas illitas e esmectitas, e para uma maior sinterização das peças (no caso das telhas e blocos) há exigência de maiores quantidades destes argilominerais.

Grupo 2 - Cerâmicas brancas

Utilizam-se massas compostas de caulins, quartzo, feldspato e argilas plásticas, com granulometria muito fina (50 a 90 % das partículas com diâmetro $< 0,001$ mm), alto poder ligante, refratariedade baixa e cor de queima branca, creme-claro e marfim. As composições básicas são caulinita (0-30 %) e quartzo (10-25 %), sendo que, subordinadamente, apresentam clorita, montmorilonita e illita, dentre outros. Para peças de cores mais escuras, admitem-se matérias-primas fundentes alternativas ao feldspato, tais como filito, pegmatito e granito. As matérias-primas

são geralmente moídas a úmido e conformadas por várias técnicas (colagem, extrusão, tornearia). A temperatura de queima atinge 1.200 a 1.250 °C.

Grupo 3 - Cerâmica de revestimento

Este segmento consome anualmente cerca de 6 milhões de toneladas de matéria-prima mineral, sendo 20 % rochas e fundentes. As placas cerâmicas são obtidas por diversas combinações de matérias-primas (simples / composta) e processos de produção (via seca / via úmida). As massas simples, via seca, são, geralmente, compostas por argilas de queima avermelhada, e as massas compostas, via úmida, são constituídas de argilas, caulins, filito e rochas feldspáticas, talco, carbonatos e quartzo. São baixos os teores de Al_2O_3 (< 25 %) e médios os de ferro (<10 %). A demanda é por matérias-primas que tenham boa sinterização em condições de queima rápida a temperaturas entre 1.000 e 1.200°C, e queimem em cores claras.

Especificações

O setor cerâmico possui especificações flexíveis e que são adaptáveis à matérias-primas locais. A maior restrição é quanto à faixa granulométrica das matérias-primas, geralmente abaixo de 0,074 mm. Para o caso dos resíduos estudados, foram feitos ensaios de avaliação do comportamento cerâmico dos materiais, sem a elaboração de massas ou dosagens. Alguns dos resíduos já apresentaram potencialidade de uso em cerâmicas vermelhas e brancas, em estudos anteriores (CUCHIERATO *et al.* 1998).

7.1.1. Materiais utilizados

Os materiais selecionados para serem submetidos aos ensaios específicos de caracterização tecnológica na área de cerâmica foram definidos no item 5.4.7.1, e compreendem as frações passantes em malha 200 # (-0,074mm); os finos de pedreira, os pulverulentos do pó de pedra, separados por peneiramento, além dos finos das minerações de areia. Esta fração é o principal passivo produtivo nas minerações de brita, uma vez que, mesmo voltando suas instalações para a produção de areia de brita, o material abaixo de 0,074 mm sempre será descartado.

A TABELA 7.3 mostra o significado deste material em relação à produção total e à quantidade de finos gerada.

TABELA 7.3 – Participação (% em volume) da fração -0,074 mm na produção total de resíduos

COD	Produção de resíduos na mineração	Participação da fração -0,074 mm nos resíduos	Significado da fração na produção total de resíduos
BR12	10 %	7,7 %	0,8 %
BR16	23 %	15,2 %	3,5 %
BR17	18 %	8,5 %	1,5 %
BR29	20 %	8,4 %	1,7 %
BR31	14 %	16,0 %	2,2 %
AR06	10 %	80,4 % *	9,6 %
AR25	n.d.	96,3 % *	n.d.
AR42c	40 %	37,7 % *	33,4 %
AR42g		78,0 % *	38,5 %

n.d. = não declarada; * = para os resíduos de mineração de areia, o limite é de 0,076 mm

Para as pedreiras, a participação da fração -0,074 mm representa muito pouco do total de brita produzido (0,8 a 3,5 %), e a principal preocupação está na acumulação das bacias de decantação, que exige disponibilidade crescente de áreas no entorno das instalações mineiras.

No caso das minerações de areia, a gravidade da problemática da disposição dos resíduos é maior, pois o material descartado corresponde a uma perda bastante expressiva da produção (9,6 a 38,5 %), sendo basicamente constituída de finos, em geral mais de 78 % abaixo de 0,074 mm. Em apenas um dos casos estudados a participação dos resíduos é menos acentuada (38 % - AR42c). Para estudo, foram incluídos: uma usina (AR06) com produção de areia com corte granulométrico em 0,15 mm feito por hidrociclones, uma mineração de areia típica (AR25), de origem sedimentar com grande quantidade de material argiloso, e uma mineração com dois tipos de resíduos (AR42), um com corte de 0,15 mm por hidrociclonagem (AR42g) e outro com todo os resíduos separados por decantação (AR42c).

As composições químicas e mineralógicas destes materiais podem ser observadas nas TABELAS 7.4 e 7.5.

TABELA 7.4 – Composição química da fração -0,074mm (teores % em peso)

ÓXIDO (% em peso)	BR12	BR16	BR17	BR29	BR31	AR06	AR25	AR42c	AR42g
SiO ₂	67,8	60,0	61,8	59,4	64,7	48,50	50,60	54,90	45,90
Al ₂ O ₃	15,6	14,1	13,3	14,1	17,6	28,30	24,70	26,60	31,90
Na ₂ O	-	2,69	2,54	2,92	2,01	0,48	0,16	0,23	0,08
K ₂ O	4,84	4,39	4,70	3,97	5,98	3,45	2,27	4,42	2,06
CaO	2,91	4,21	4,19	3,98	2,51	0,47	0,63	0,06	0,07
MgO	1,37	2,84	2,65	4,02	0,81	1,27	0,93	0,19	0,11
MnO	0,08	0,08	0,07	0,09	0,06	0,07	0,02	0,07	0,07
Fe ₂ O ₃	4,17	6,28	6,17	7,27	2,63	4,69	6,68	3,43	3,48
TiO ₂	0,96	1,31	1,27	1,20	0,25	0,79	0,97	0,26	0,23
P ₂ O ₅	<0,01	0,99	0,96	0,99	< 0,01	0,22	0,19	0,07	0,10
P.F.	1,66	2,46	1,71	1,47	2,78	11,30	12,40	9,39	15,80

TABELA 7.5 – Composição mineralógica da fração -0,074mm (minerais principais)

CÓD	MINERALOGIA DA FRAÇÃO -0,074 MM
BR12	Quartzo, K Feldspato (Microclínio), Plagioclásio, Biotita, Clorita
BR16	Quartzo, K Feldspato (Ortoclásio), Plagioclásio, Piroxênio, Biotita, Flogopita, Caolinita
BR17	Quartzo, K Feldspato (Microclínio), Plagioclásio, Flogopita, Anfibólio
BR29	Quartzo, K Feldspato (Microclínio), Plagioclásio, Biotita Piroxênio
BR31	Quartzo, K Feldspato (Microclínio), Plagioclásio, Muscovita
AR06	Quartzo, K Feldspato (Microclínio), Plagioclásio, Muscovita, Biotita, Caulinita
AR25	Quartzo, K Feldspato (Microclínio e Ortoclásio), Muscovita, Caulinita
AR42c	Quartzo, K Feldspato (Microclínio), Muscovita, Flogopita, Piroxênio, Caulinita, Anortoclásio, Hidrobiotita
AR42g	Quartzo, K Feldspato (Microclínio), Muscovita, Caulinita

Analisando os dados de composição química e mineralógica dos resíduos de mineração de brita, deduz-se, preliminarmente, que os resíduos sem adição de outros materiais dificilmente poderiam ser fonte de matéria-prima para a indústria cerâmica, pois a granulometria não é adequada e além da inexistência de material plástico (pouca quantidade de caulinita e outros argilominerais). A composição química não é um fator limitante do uso destes materiais em cerâmicas; são materiais com baixos teores de ferro, sem presença de matéria orgânica.

Para os resíduos de mineração de areia, além de apresentarem composições química (menores teores de SiO₂ e álcalis, maiores teores de Al₂O₃ e perda ao fogo) e mineralógica (maior presença de caulinita) favoráveis, também apresentam granulometria adequada, o que proporciona melhores resultados cerâmicos. A quantidade de material abaixo de 0,076 mm, conforme foi indicado na **TABELA 7.3**, é geralmente acima de 78 %.

7.1.2. Resultados obtidos

Os resultados obtidos indicam o comportamento cerâmico dos resíduos estudados, sem ter sido feita qualquer adição de outros componentes típicos das massas cerâmicas tradicionais.

Para os resíduos de mineração de brita, foram obtidos apenas dados qualitativos (TABELA 7.6), uma vez que os materiais apresentaram muita dificuldade de conformação na prensagem dos corpos-de-prova, impossibilitando a determinação de parâmetros físicos. Foram determinados alguns parâmetros comparativos, tais como resistência mecânica, retração de queima, brilho, deformação planar e cor, de forma a melhor avaliar os resultados, que podem ser observados nas FOTOS 7.1 a 7.4.

TABELA 7.6 – Comportamento cerâmico qualitativo dos resíduos de mineração de brita

CÓD	PARÂMETROS	QUEIMA 950°C	QUEIMA 1.100°C	QUEIMA 1.250°C
BR12	Resistência mecânica	Muito baixa	n.d.	n.d.
	Retração linear na queima	Muito baixa	n.d.	n.d.
	Deformação planar	Ausente	n.d.	n.d.
	Brilho	Nenhuma	n.d.	n.d.
	Cor	Marron médio a claro	n.d.	n.d.
BR16	Resistência mecânica	Baixa a Muito baixa	Média	Fusão com escorrimento e formação de bolhas
	Retração linear na queima	Muito baixa	Média	
	Deformação planar	Ausente	Alta	
	Brilho	Fosco	Fosco	
	Cor	Marrom médio	Marrom médio a escuro	
BR17	Resistência mecânica	Muito baixa	n.d.	n.d.
	Retração linear na queima	Muito baixa	n.d.	n.d.
	Deformação planar	Ausente	n.d.	n.d.
	Brilho	Nenhum	n.d.	n.d.
	Cor	Marrom acinzentado	n.d.	n.d.
BR31	Resistência mecânica	Baixa	Média	Alta
	Retração linear na queima	Muito baixa	Baixa a média	Irregular
	Deformação planar	Nenhum	Baixa	Baixa
	Brilho	Fosco	Fosco	Vítreo (fusão parcial)
	Cor	Marron médio a claro	Marrom médio	Marrom escuro

FOTO 7.1 – Corpos-de-prova do resíduo BR12

FOTO 7.2 – Corpos-de-prova do resíduo BR16

FOTO 7.3 – Corpos-de-prova do resíduo BR17

FOTO 7.4 – Corpos-de-prova do resíduo BR31

As dimensões dos corpos-de-prova são iguais (60 x 20 x 4 mm), e as fotos foram tiradas de forma a dar maior detalhe às características interessantes.

A partir de quatro casos estudados não se verificou qualquer correlação entre textura e índice de máficos da rocha -fonte com os resultados dos ensaios de

queima. Todas as amostras *in natura* não apresentaram plasticidade suficiente para a compactação e conformação adequada dos corpos-de-prova, ações que fazem parte da segunda etapa do processo de fabricação de peças cerâmicas (vide **TABELA 7.2**). Os casos BR12 (**FOTO 7.1**) e BR17 (**FOTO 7.3**) ilustram bem esta inadequação, esfarelando ao toque mesmo após queima a 950°C.

Os resíduos das minerações BR16 (**FOTO 7.2**) e BR31 (**FOTO 7.4**), cujos corpos-de-prova permaneceram inteiros e permitiram a observação do comportamento em outras temperaturas de queima, apresentaram resultados semelhantes, com fusão total (BR16) ou parcial (BR31) a 1.250°C. A amostra BR16 apresenta mais altos teores de álcalis ($K_2O + Na_2O$), $CaO + MgO$ e Fe_2O_3 que a amostra BR31, o que deve ter favorecido a fusão total do primeiro caso. Outro fator que deve ter contribuído para a fusão total pode ter sido a quantidade de material com granulometria abaixo de 0,074 mm, com maior superfície de contato entre os grãos para a BR16 do que a BR31.

As bolhas visualizadas na amostra BR16 podem ser consequência da eliminação de água estrutural (hidroxila) das micas (biotita, flogopita ou muscovita), presentes nesta fração. Devido a esta propriedade, este material pode ser melhor estudado para uso em cerâmica vermelha ou estrutural, como agregado leve, cuja temperatura de queima não atinge 1.100°C. O agregado leve sinteriza na superfície, permanecendo o interior preenchido por vazios deixados pelas bolhas, sem que elas se rompam. Estes resíduos não poderiam ser utilizados em processos cerâmicos de queima rápida, como é o caso dos pisos do setor de revestimento, pois dariam defeitos nas peças, além de cores escuras.

Para processos térmicos que utilizam temperaturas mais baixas (900 a 950°C), como no caso da produção de tijolos e telhas, os resíduos só poderiam ser utilizados como fundentes se adicionados em proporções ideais de Quartzo + K Feldspato + Plagioclásio que permita ativar o ponto eutético destes minerais, e fundir a massa cerâmica. No caso de não atingir a fusão, os resíduos atuam como redutor de plasticidade das massas.

Cabe ressaltar que a amostra BR16 é representativa dos finos de pedreira, material lavado no processo de beneficiamento a úmido, atualmente separado nas minerações e acumulado em bacias de decantação.

Para os resíduos de mineração de areia, foram obtidos resultados mais interessantes que para os resíduos de mineração de brita, conforme podem ser observados nas **FOTOS 7.5 a 7.8**, e a **TABELA 7.6**.

FOTO 7.5 – Corpos-de-prova do resíduo AR06

FOTO 7.6 – Corpos-de-prova do resíduo AR25

FOTO 7.7 – Corpos-de-prova do resíduo AR42c

FOTO 7.8 – Corpos-de-prova do resíduo AR42g

TABELA 7.7 – Comportamento cerâmico dos resíduos de mineração de areia

FASE	DETERMINAÇÕES	AR06	AR25	AR42c	AR42g
Secagem (110°C)	Módulo de Ruptura à Flexão (MPa)	0,4	1,6	1,2	2,2
	Cor	Rosa médio	Cinza	Bege	Bege escuro
Queima (950°C)	Retração linear na queima (%)	- 0,27	- 2,66	+0,43	- 0,66
	Módulo de Ruptura à Flexão (MPa)	1,8	9,4	2,3	3,7
	Massa específica aparente (g/cm ³)	1,58	1,90	1,83	1,78
	Absorção d'água (% em peso)	23,10	14,0	14,97	16,87
	Porosidade aparente (% em volume)	36,54	26,60	27,37	30,23
	Cor	Bege avermelhado	Vermelho claro	Rosa avermelhado	Rosa avermelhado
Queima (1.110°C)	Retração linear na queima (%)	- 10,04 **	- 8,47	- 0,70	- 2,70
	Módulo de Ruptura à Flexão (MPa)	36,5 **	20,3	4,5	14,5
	Massa específica aparente (g/cm ³)	2,31 **	2,31	1,88	1,91
	Absorção d'água (% em peso)	3,17 **	3,83	12,73	13,33
	Porosidade aparente (% em volume)	7,33 **	8,87	24,00	25,47
	Cor	Marrom claro **	Vermelho	Rosa médio	Rosa claro

* o sinal positivo para retração linear significa expansão, e o negativo retração; ** esta amostra foi queimada a 1.250°C.

Os resíduos da mineração AR06 apresentaram resistência à flexão muito baixa a verde e a 950°C. A baixa resistência a verde faz com que ocorram problemas no fabrico das peças, dificultando o manuseio industrial e sendo necessária a adição de argilas mais plásticas, que aumentem a resistência. Em compensação, ocorre a fusão parcial a 1.250°C, com sinterização avançada nas bordas de grãos, indicando que a maioria das reações químicas acontece nesta temperatura, garantindo peças com boa resistência mecânica, pouca deformação e baixa absorção d'água, queima não muito escura, mas com perda de planaridade. Seu uso como pisos cerâmicos poderia ser feito se utilizados em proporções reduzidas, talvez de 10 a 20 % da massa total.

A amostra AR25 gerou os melhores resultados, tendo formado um produto semi-greisificado segundo MOTTA (2000), autor que apresenta os tipos de revestimentos segmentados de acordo com os resultados de absorção d'água e resistência à flexão (TABELA 7.8).

TABELA 7.8 – Tipologia das placas cerâmicas (MOTTA 2000)

TIPOLOGIA CERÂMICA	ABSORÇÃO D'ÁGUA (% em peso)	RESISTÊNCIA A FLEXÃO (MPa) Queima 1.100°C
Grés porcelânico	0,0 - 0,5	> 35
Grés	0,5 - 3,0	> 30
Semi-grés	3,0 - 6,0	> 22
Semi-poroso	6,0 - 10	> 18
Piso-poroso	10 - 20	> 15
Azulejo	10 - 20	> 15
Azulejo fino	10 - 20	> 12

A peça apresentou ótima planaridade, sem deformação, baixa absorção d'água, alta retração linear de queima e resistência mecânica dentro do limite aceitável para revestimento. Para aumentar a resistência, seria interessante a adição de argilas mais plásticas ou a elevação na temperaturas de queima. Para uso em tijolos e telhas, que aceitam materiais com resistências menores e absorção d'água maior (**TABELA 7.9**), os resíduos AR25 indicam valores bem superiores aos recomendados e poderiam ser utilizados sem aditivos.

TABELA 7.9 – Parâmetros determinativos do uso em tijolos e telhas (SOUZA SANTOS 1989)

MASSA CERÂMICA	ABSORÇÃO D'ÁGUA (% em volume)	RESISTÊNCIA À FLEXÃO (MPa)	
	(após a queima)	Secagem (110°C)	Queima (1.100°C)
Tijolos de alvenaria	-	1,4	1,8
Tijolos furados	25 %	2,3	5,0
Telhas	20 %	2,8	6,0

Os resíduos AR42c e AR42g são gerados na mesma mineração e diferem quanto à classificação granulométrica da produção da areia, sendo respectivamente feitos por caixas de decantação e hidrociclones. A retração linear de queima e absorção d'água são semelhantes em ambos os casos. Os fundentes estão presentes em diferentes quantidades, sendo mais do que o dobro na AR42c (4,65 %) em relação à AR42g (2,14 %), e não tiveram ação até as temperaturas de 1.100°C. Possivelmente, a temperatura necessária para ativa-los não foi atingida (ponto eutético dos minerais refratários Quartzo+K-Feldspato+Plagioclásio), acrescentando-se ao fato dos resíduos da AR42c apresentarem muscovita e flogopita em placas milimétricas, as quais diminuem a superfície de contato entre as partículas, interferindo nas reações do processo térmico. A queima deste material gera produtos com baixa resistência mecânica, baixa ligação química e presença de defeitos, que são pontos preferenciais de fraqueza.

Dos resíduos da mineração AR42, o mais interessante para aplicação em cerâmica é o material AR42g, por ser menos micáceo, bem como mais caulínítico. O melhor uso seria na confecção de azulejos e pisos claros do setor de revestimentos, fabricados pelo processo de via úmida, por se encontrar acumulado em bacias de decantação.

As **FIGURAS 7.1 a 7.4** resumem e ilustram o comportamento cerâmico nas temperaturas de queima testadas para os resíduos de mineração de areia em estudo.

FIGURA 7.1 - Resistência mecânica a flexão (MPa)

FIGURA 7.2 - Massa específica aparente (g/cm³)

FIGURA 7.3 - Porosidade aparente (%)

FIGURA 7.4 - Absorção d'água (%)

Conclui-se que os resíduos finos mostram-se de interesse para a aplicação em cerâmicas. No entanto, faz-se necessário o desenvolvimento de estudos sistemáticos, com adição de matérias-primas variadas na massa (argilas plásticas), para determinação da melhor composição / dosagem para cada tipo de material, a partir do estabelecimento de curvas de greisificação, com a correlação de retração linear *versus* absorção d'água, dentre outros estudos pormenorizados.

7.2. INDÚSTRIA VIDREIRA

O vidro é um dos materiais básicos que pode ser transformado em grande número de produtos com propriedades físicas e químicas bem distintas, utilizados nas indústrias e na construção civil, e amplamente difundido na sociedade. Em termos técnicos, é definido pela ASTM como *um material inorgânico formado pelo processo de fusão, que foi resfriado a uma condição rígida, sem cristalizar* (ABIVIDRO 2000). As qualidades desejáveis do vidro dependem do uso a ser dado ao material, e caso a caso variam as propriedades mecânicas (dureza, resistência, durabilidade, etc.), térmicas (isolante), óticas (transparência) ou elétricas (isolante).

O vidro é fabricado a partir de matérias-primas abundantes, tais como: areia, barrilha, borax, calcário, dolomita, feldspato, nefelina sienito, sulfato de sódio, hematita, silicato de chumbo entre outros, além do próprio caco de vidro.

Existem quatro estágios básicos na fabricação de todos os produtos de vidro:

- ✓ seleção, composição ou preparação da misturas das matérias-primas a seco;
- ✓ fusão dessas matérias-primas em um forno revestido de material refratário especial, para fusão em altas temperaturas, da ordem de 1.500°C, e sua transformação em material líquido;
- ✓ conformação a quente dos objetos pelos processos de estiragem, laminação, sopro, prensagem, centrifugação, etc.;
- ✓ recozimento, que permite aliviar as tensões provocadas durante os processos de conformação e conferir aos objetos uma boa resistência mecânica.

O processo de fusão é muito complexo e envolve basicamente reações químicas entre as diversas matérias-primas, com a formação de fases líquidas e homogêneas, eliminação dos gases produzidos nas reações químicas e, finalmente, formação de uma massa vítrea homogênea pronta para ser conformada.

Os vidros são classificados segundo seu uso final, em cinco tipos (ABIVIDRO 2000):

- ⇒ vidro de embalagem (perfumaria, fármacos, bebidas, etc.);
- ⇒ vidro plano,

⇒ *fibra de vidro,*

⇒ *vidro de uso doméstico; e*

⇒ *vidro técnico (iluminação, cinescópios, isoladores/tijolos, garrafas térmicas, ampolas, oftálmico e laboratório).*

Dentre todos os tipos, quase 90% do vidro fabricado mundialmente é denominado *vidro soda-cal* e o principal componente dos vidros silicatos é a sílica (SiO_2). Para reduzir a temperatura de fusão do vidro é necessário utilizar um fundente, sendo que o mais utilizado na indústria de vidros é o óxido de sódio. O sistema $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ tem um baixo ponto de fusão porém este vidro é solúvel em água e é necessário acrescentar um terceiro elemento, o óxido de cálcio, para dar uma estabilidade química. Estes três componentes, SiO_2 , Na_2O e CaO já constituem mais do que 90% da composição do vidro soda-cal.

O vidro soda-cal industrial é normalmente composto por outros elementos, como os óxidos MgO e K_2O que podem substituir parcialmente os óxidos de CaO e Na_2O respectivamente, conforme a disponibilidade de matérias-primas. Além destes cinco óxidos principais, o vidro soda-cal tem mais dois óxidos de importância na formulação, que são o Al_2O_3 e Fe_2O_3 . A alumina é acrescida à formulação do vidro para melhorar a sua durabilidade química, inibir a cristalização durante o seu resfriamento e controlar a viscosidade do vidro, propriedade muito importante em todas as etapas de fusão, conformação e recozimento do vidro.

O Fe_2O_3 é uma impureza na maioria das matérias-primas naturais e para os vidros brancos de alta qualidade é necessário minimizar a quantidade deste óxido na formulação. Este óxido tem uma grande influência na coloração e para a área de vidros transparentes de alta qualidade é essencial utilizar-se areias com teores de Fe_2O_3 bem reduzidos (<0,02%).

7.2.1. Especificações

As especificações de matérias-primas para fabricação do vidro refletem o ideal para a indústria vidreira, dentro da realidade do mercado fornecedor de insumos no Brasil. No entanto, nada impede que, por motivos econômicos seja considerado o uso de matérias-primas estratégicas, que embora não se enquadrem nestas especificações, possuam contaminantes aceitáveis e com variações de teor

que possam ser toleradas. Poderia ser utilizada, por exemplo, uma areia feldspática cujos teores de SiO_2 e Al_2O_3 estivessem fora das especificações, mas com proporções de feldspato mantidas constantes; com regularidade das propriedades químicas e físicas, principalmente no fornecimento. Certas impurezas contidas nas matérias-primas são indesejáveis tendo limites de aceitação dependendo do tipo de vidro a ser produzido, tais como óxidos que conferem cor ao vidro.

As especificações para a fabricação do vidro contém indicações a respeito de: limites de valores máximos e mínimos de composição química dos componentes maiores e elementos prejudiciais, tais como Fe_2O_3 , óxidos colorantes, etc.; características granulométricas bem definidas para as misturas de matérias-primas, umidade permitida, dentre outras indicações. Nas especificações técnicas para vidros de embalagem, observa-se a composição química total do produto na **TABELA 7.10**.

TABELA 7.10 – Composição química de alguns vidros (% em peso)

TIPO DE VIDRO	SiO_2	Al_2O_3	Alcalis	MgO	CaO	BaO	Fe_2O_3
Semibranco para embalagens	69 - 73	1 - 2,5	12 - 17	1 - 2,5	8 - 10	0,5	< 0,1
Verde para embalagens	65 - 71	1 - 5	12 - 17	1 - 2	8 - 12	-	0,2 - 2

A composição mineralógica, a menos da presença de minerais infusíveis, não é uma das características que influem na escolha da matéria-prima do vidro, uma vez que a composição química nada mais é que o reflexo da assembléia mineralógica existente.

7.2.2. Materiais utilizados e resultados obtidos

Vislumbrando a possibilidade de fontes suscedâneas de matérias-primas, esta pesquisa partiu da hipótese da substituição de uma parcela da areia e dos fundentes da massa total dos vidros para embalagem por alguns dos resíduos em estudo, após a comparação dos resultados de caracterização tecnológica dos resíduos e os dados de especificação dos vidros mais comuns.

De um modo geral, os resíduos se caracterizam como uma areia feldspática de interesse pelo conteúdo de alumínio e álcalis (**TABELA 7.11**), embora possuam teores excessivos de ferro e titânio, restringindo a expectativa de sua eventual aplicabilidade aos vidros coloridos de embalagem. Foram, assim, selecionados os

casos que apresentam os mais baixos teores de óxidos colorantes (BR12/BR31/AR42c).

TABELA 7.11 – Composição química da fração -0,59 +0,074 mm

ÓXIDO (% em peso)	BR12	BR16	BR17	BR29	BR31	AR42c
SiO ₂	72,5	67,4	69,1	65,5	76,2	62,0
Al ₂ O ₃	12,6	13,3	12,9	12,5	10,8	21,2
Na ₂ O	2,75	2,80	2,75	2,61	2,72	0,40
K ₂ O	4,31	4,63	4,70	3,91	3,21	6,28
CaO	1,87	2,41	2,71	3,68	1,64	0,20
MgO	0,96	2,42	2,71	3,68	0,48	0,50
MnO	0,05	0,07	0,06	0,09	0,03	0,08
Fe ₂ O ₃	3,32	4,15	4,13	6,77	1,86	3,28
TiO ₂	0,56	0,68	0,71	1,24	0,17	0,28
P ₂ O ₅	<0,01	0,35	<0,01	<0,01	0,06	0,06
P.F.	0,75	1,30	0,99	1,09	1,75	5,50
Outros	0,41	0,49	0,64	0,46	1,06	-

Os materiais utilizados nos ensaios de vidro compreendem as frações intermediárias do pó de pedra com granulometria entre 0,59 e 0,074 mm, e os resíduos de mineração de areia com fração granulométrica maior que 0,074 mm. Esta fração corresponde a 38,26 a 43,41 % do total descartado pelas minerações estudadas (vide **TABELA 7.12**).

TABELA 7.12 – Participação (% volume) da fração -0,59 +0,074 mm na produção total de resíduos

CÓD	Produção de resíduos na mineração	Participação da fração nos resíduos	Significado da fração na produção total de resíduos
BR12	10 %	38,26 %	3,8 %
BR31	14 %	43,41 %	6,1 %
AR42c	10 %	47,0 %	4,7 %

Os ensaios de fusibilidade foram feitos para checar se o material poderia ser usado na massa do vidro, como fonte total de alumínio na formulação da mistura, sendo que a contribuição deste óxido viria principalmente dos feldspatos dos resíduos. Um outro teste foi também feito com a amostra AR42c (caso 2), considerando-a como fonte total de ferro e ajustando a mistura com adições de outros componentes.

A massa do vidro feita no ensaio teve a composição de mistura das matérias-primas conforme apresentado na **TABELA 7.13** e ilustrado na **FIGURA 7.5**.

TABELA 7.13 – Formulação das matérias-primas na composição dos vidros

MATÉRIAS-PRIMAS (% em peso)	BR12	BR31	AR42c (caso 1)	AR42c (caso 2)
Areia (Jundu)	53,67	52,23	57,34	56,30
Barrilha	18,50	18,52	19,02	18,88
Sulfato de Sódio	0,24	0,24	0,24	0,24
Calcário	17,86	17,86	18,16	18,15
Resíduos (pó de pedra)	9,73	11,36	5,77	7,02

FIGURA 7.5 – Distribuição das matérias-primas na composição dos vidros

As massas aplicadas nas formulações foram sensivelmente maiores para os resíduos de mineração de brita. Os teores obtidos na composição da massa dos vidros encontram-se listados na **TABELA 7.14**. As **FOTOS 7.9 a 7.13** mostram os vidros obtidos com a fusão.

TABELA 7.14 – Composição dos vidros ensaiados (teores em % peso)

ANÁLISES	SiO₂	Al₂O₃	Na₂O	K₂O	MgO	CaO	Fe₂O₃	TiO₂	SO₃
Composição padrão Santa Marina	71,83	1,5	13,0	0,7	0,0	12,0	0,3	-	0,25
BR12	71,935	1,5	13,203	0,497	0,132	12,0	0,409	0,074	0,25
BR31	72,132	1,5	13,268	0,432	0,066	12,0	0,3	0,032	0,25
AR42c (caso 1)	72,165	1,5	13,270	0,43	0,056	12,0	0,3	0,029	0,25
AR42c (caso 2)	71,841	1,813	13,177	0,523	0,063	12,0	0,3	0,033	0,25

FOTO 7.9 – Vidro feito com a amostra BR12

FOTO 7.10 – Vidro feito com a amostra BR31

FOTO 7.11 – Vidro feito com a amostra AR42c
(caso 1)

FOTO 7.12 – Vidro feito com a amostra AR42c
(caso 2)

BR31

BR12

AR42c (1)

FOTO 7.13 – Comparação entre os vidros obtidos

Nota-se que as formulações referentes ao ajuste pelo alumínio (BR12 ,BR31e AR42c caso 1), mostram fundamentais diferenças em relação ao padrão utilizado pela Vidraria Santa Marina, quanto aos teores de K_2O (inferiores) e MgO (superiores). A composição feita com o resíduo da BR12 apresentou teores ainda mais elevados de magnésio, ferro e titânio, em relação às demais. A formulação feita com a AR42c caso 2, feita para o ajuste do ferro, embora com melhor teores mais interessantes para o potássio, acabou ficando com significativo excesso de alumínio, o que ocasionou outras complicações quanto ao resultado final.

Os ensaios tecnológicos realizados indicaram que os resíduos, quando utilizados como fonte de Al_2O_3 , apresentam o comportamento à fusibilidade bastante interessante para sua utilização na indústria do vidro, sem máculas ou trincas. Para o setor de embalagens, a coloração que foi obtida, em ambiente redutor em laboratório, é aceitável, ficando entre verde claro e verde médio. Nesta escala, os desvios da formulação padrão notados nas composições químicas, mostraram-se com pouca interferência na qualidade do vidro. As diferenças se fizeram notar no aspecto de cor, no qual a formulação com maior quantidade de ferro e titânio também forneceu um vidro de tonalidade clara (BR12 - FOTO 7.9), mais claro ainda que BR31 (FOTO 7.10), com cerca de 45 % a menos de ferro e titânio.

No caso da utilização dos finos de mineração de areia como fonte de Fe_2O_3 , o ensaio de fusibilidade produziu um vidro não homogêneo devido à alta viscosidade, e com baixa resistência mecânica, o que foi evidenciado pelo seu estilhaçamento quando da tentativa de fazer uma placa circular para análises posteriores (FOTO 7.12).

Os resultados obtidos para os resíduos como fontes alternativas para a indústria vidreira foram **positivos**, do ponto de vista tecnológico, baseando-se apenas no ensaio preliminar de fusibilidade. A constância nos teores dos resíduos é outro dos fatores a ser verificado, pois mesmo quantidades altas de ferro, por exemplo, não inviabilizariam seu uso, se fossem mantidas constantes, como é o caso dos fonolitos de Santa Catarina, ora utilizados em vidros coloridos. Em havendo interesse das minerações na aplicação de seus resíduos na indústria vidreira, e considerando as características mineralógicas observadas, sugere-se investigações na linha do beneficiamento. Separações magnéticas de média a alta

intensidade poderiam reduzir teores de ferro a níveis que possibilitariam aplicações mais nobres, agregando valor ao produto.

Porém, não apenas estes fatores são levados em consideração, pois este segmento industrial é tradicionalista e rígido quanto à qualidade da matéria-prima. De qualquer forma, tem-se que os resíduos de mineração de agregados podem ser considerados matérias-primas estratégicas para a elaboração de vidros de embalagem, devendo ser melhor estudados no momento oportuno.

7.3. INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL E PAVIMENTAÇÃO

Os agregados minerais utilizados em obras de engenharia podem ter seus fragmentos unidos por ligantes, como nos concretos, ou sem ligantes, como no caso de lastros de ferrovia, filtros e enrocamentos. Neste trabalho foi verificado apenas o comportamento dos agregados com ligantes, para uso em pavimentos de concreto.

Os tipos de concreto enfocados nesta pesquisa são usados nas pavimentações de rodovias e vias de tráfego, considerando a possível aplicação dos resíduos como agregado miúdo nas obras de duplicação de rodovias e construção do anel viário que estão sendo realizados na RMSP. Outros tipos de concreto também poderiam utilizar os resíduos, como é o caso dos blocos e pré-moldados de concreto, com seu uso já amplamente difundido, mas que não serão abordados. O uso de resíduos em concreto estrutural também vem sendo estudado por empresas de mineração, concreteiras e empresas de equipamentos (TERRA 2000, GONÇALES *et al.* 2000), mas não será alvo deste trabalho.

Pavimentos podem ser definidos como sendo uma estrutura em camadas, sendo que as inferiores têm como principal função absorver os esforços gerados na superfície (camada de rolamento), de modo a manter a estabilidade do solo. Quando o pavimento é assentado diretamente sobre o solo, geralmente surgem problemas de deformação e afundamentos na superfície de rodagem, resultantes do peso e do movimento dos veículos, o que provoca um deslocamento lateral das camadas do solo. Desta forma, é necessário a construção de um estrato que transmita os esforços provenientes da superfície ao solo, geralmente denominada base, sobre a qual se apoia a camada de revestimento. Para diminuir os esforços transmitidos ao solo, é comum a existência também de uma camada chamada sub-base.

Existem algumas classificações entre os tipos de pavimentos, e dentre elas aquela que subdivide em: pavimentos rígidos, onde a base e o revestimento são apenas uma camada, e pavimentos flexíveis, onde a base encontra-se separada por emulsão asfáltica. O uso do pavimento rígido, em detrimento ao flexível, está sendo inserido na premissa básica da gestão ambiental em muitos países, uma vez que o pavimento rígido tem vida útil substancialmente maior com menor número de intervenções para reparos, sendo ainda considerada sua reciclabilidade em contraposição ao pavimento flexível, que apresenta menor durabilidade e elevado consumo de combustíveis fósseis (PITTA & MARCIANO JR. 1999).

Historicamente, o concreto foi destinado prioritariamente para a construção civil no período pós 2ª Guerra Mundial, com a difusão da pavimentação em pavimentos flexíveis, à base de produtos betuminosos, seguindo a tendência dos USA (ABCP 2000). Todos os equipamentos e infraestrutura necessários para a pavimentação no Brasil foram, então, adequados ao asfalto, mesmo que o material utilizado não fosse derivado no petróleo nacional.

Nas últimas décadas, a partir da instabilidade e evolução dos preços do petróleo e seus derivados, houve um retorno a realização de pesquisas voltadas à aplicação de pavimentos de concreto (ABESC 2000, PITTA 1996, CARVALHO 1998, PALAZZO & LEITE 1998 e outros), e verificou-se que este tipo de material têm inúmeras vantagens em relação ao pavimento asfáltico. Outro estímulo ao aumento do emprego de pavimentos de concreto foi a concessão da administração das rodovias estaduais, onde as concessionárias são obrigadas a gerar melhorias duradouras nos pavimentos a baixo custo inicial e final, com menores problemas de manutenção. Em relação aos custos gerais de execução do pavimento, aquele feito em concreto é cerca de 13 % mais econômico em relação ao piso asfáltico.

Estudos de HALLACK & SILVA (1998) concluíram que o custo inicial (custo de construção) do pavimento de concreto é apenas 5,5 % maior que o do pavimento asfáltico, sendo que o custo anual de serviço pelo primeiro é cerca de 38 % menor que pelo último, e o Valor Presente Líquido (VPL) do custo de manutenção do primeiro é 90 % menor que o do segundo. Verificaram ainda que o pavimento asfáltico requer maior manutenção (mais custosa que para o pavimento de concreto) e apresenta maior deterioração, acarretando em maiores transtornos ao tráfego e aumento dos custos operacionais de veículos.

As vantagens do pavimento de concreto sobre o pavimento asfáltico encontram-se listadas na **TABELA 7.15**

TABELA 7.15 – Principais vantagens do pavimento de concreto

CONCRETO	ASFALTO
ECONOMIA	
<ul style="list-style-type: none"> • Custo inicial moderado; • Desempenho a longo prazo com pouca manutenção; • Custo anual baixo; • Qualidade da superfície mantida ao longo de muitos anos; • Economia de 30 % nas despesas com iluminação das vias 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo inicial é função do aumento do preço do petróleo; • Manutenção rotineira cara; • Custo anual alto e de difícil previsão; • Os buracos e afundamentos são frequentes e causam sérios danos aos veículos.
DESEMPENHO	
<ul style="list-style-type: none"> • Vida útil superior a 20 anos; • Alta resistência a produtos químicos, óleos e intempéries; • Grande conservação da integridade da seção transversal; • Boa distribuição das cargas; • Alta impermeabilidade; • Grande estabilidade em variações de temperatura 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa vida útil; • Baixa resistência aos mesmos agentes; • Alta deformação e afundamento, com formação de trilhas de rodas, buracos e painéis; • Má distribuição de cargas; • Alta porosidade; • Instabilidade a variações de temperatura, produzindo amolecimento e perda do material
CONSUMO DE ENERGIA NA CONSTRUÇÃO	
<ul style="list-style-type: none"> • Usa matérias-primas locais, em abundância na natureza; • Quantidade de equipamentos reduzida, semi-mecanizados, com baixo consumo de combustível 	<ul style="list-style-type: none"> • Derivado de petróleo importado; • Equipamentos de grande porte, com alto consumo de combustível.
CONSTRUÇÃO	
<ul style="list-style-type: none"> • Número máximo de camadas: 2 • Rapidez na execução, com concreto dosado em central • Utilização de mão de obra não especializada e abundante • Equipamento simplificado 	<ul style="list-style-type: none"> • Camadas múltiplas • Quantidade variável de serviços e materiais • Utilização de mão de obra especializada e escassa • Equipamento complexo e numeroso.
MANUTENÇÃO	
<ul style="list-style-type: none"> • Pequena necessidade de manutenção rotineira • Manutenção pesada ou reforço após 25 anos ou mais • Reparos uniformes e regulares • Pouca aplicação de mão de obra e equipamentos simples 	<ul style="list-style-type: none"> • Remendos e substituições rotineiros, com interrupção de tráfego; • Reforços e recapeamentos após o 5º. ano; • Reparos inadequados e irregulares • Equipamentos complexos e intensa aplicação de mão de obra
SEGURANÇA	
<ul style="list-style-type: none"> • Excelente reflexão da luz, com maior distância de visibilidade horizontal; • Pode-se dar a textura desejada à superfície, com melhor resistência à derrapagem; • Menor inclinação da seção transversal, com melhor controle dos veículos • Melhor escoamento superficial da água • Maior integridade da pista ao longo do tempo 	<ul style="list-style-type: none"> • Má reflexão da luz e visibilidade horizontal • Superfície lisa e escorregadia quando molhada • Grande inclinação da seção transversal, com dificuldade de controle dos veículos • Maior retenção de água devido à rugosidade superficial • Deterioração e deformação da superfície, prejudicando a segurança e conforto

Fonte: modificado de ABESC (2000)

7.3.1. Pavimentos de Concreto

Os tipos principais de pavimentos de concreto (ABCP 2000) são:

- ⊗ Concreto Simples (CS);
- ⊗ Concreto Simples com barras de transferência;
- ⊗ Concreto com armadura distribuída descontínua sem função estrutural;
- ⊗ Concreto com armadura contínua sem função estrutural;
- ⊗ Concreto protendido;
- ⊗ Whitetopping;
- ⊗ Concreto compactado com rolo (CCR).

Dentre estes tipos, optou-se por estudar o comportamento dos resíduos de mineração de brita em apenas dois deles, CS e CCR, por serem os mais utilizados em grandes obras, e demandarem grande quantidade de agregados miúdos. Para ter uma idéia de valores, nas obras do Rodoanel, na construção dos 31,6 km do projeto inicial (de um total de 162 km), com sub-base em concreto rolado e base em concreto simples, serão construídos, respectivamente 400.000 m³ e 700.000 m³ de concreto, o que deve demandar uma grande quantidade de agregados miúdos (cerca de 560 milhões de m³).

A malha viária do país é da ordem de 1,7 milhões de km (ABCP 2000), sendo apenas 160 mil km pavimentados e apenas 3,6 mil em concreto (**FIGURA 7.6**). Observa-se que há uma carência acentuada em pavimentação no Brasil.

FIGURA 7.6 – Situação da pavimentação na malha viária no Brasil (ABCP 2000)

A utilização de resíduos de mineração de areia e brita neste setor pode reduzir custos com o fornecimento de agregados miúdos para a pavimentação das rodovias, além de torná-los ainda mais corretos ambientalmente. Desta forma, esta pesquisa visou a utilização do pó de pedra como agregado miúdo, e a caracterização tecnológica deste material permitiu verificar seu comportamento em comparação com os materiais convencionalmente empregados, através da realização de ensaios de aplicação.

Todos os testes de aplicação dos materiais estudados foram feitos comparativamente aqueles utilizados no projeto do Rodoanel, uma vez que, se comprovada a boa eficiência técnica e econômica dos resíduos, poderiam ser aplicados já nesta obra e os problemas com o pó de pedra e areia de brita poderiam começar a ser minimizados na RMSP.

O pavimento de concreto foi dimensionado segundo padrões internacionais (HALLACK & SILVA 1998), com a sub-base em concreto rolado (CCR) de 12 cm e a base em concreto simples (CS) de 24 cm. As placas de concreto têm dimensões características de 5 m de comprimento por 3,6 m de largura, e o CS utilizado deve ter resistência mecânica a tração na flexão medida aos 28 dias igual a 4,5 MPa e resistência mecânica à compressão simples em torno de 35 MPa. O CCR para sub-base deve ter resistência à compressão simples medida aos 7 dias igual a 5 MPa. O cimento utilizado em todos os ensaios foi o CP II E 40, com 0,2 % de resíduo na peneira 200 # (-0,074 mm), e resistências à compressão simples em 3, 7 e 28 dias respectivamente, 27,6, 34,8 e 45,9 MPa. O agregado graúdo escolhido foi a Pedra 1, granítica, de forma cúbica.

7.3.2. Pavimento de Concreto Simples (CS)

O pavimento de concreto simples é uma estrutura sujeita a ações mecânicas e ambientais, onde são exigidas elevadas resistências à tração na flexão e à compressão simples, de modo a dar-lhe durabilidade (PITTA 1998a). Como apresenta uma alta relação área/volume e condições típicas de concretagem, o pavimento de concreto requer um concreto duro, de consistência seca, mas com certa trabalhabilidade que permita um resultado homogêneo, denso e de grande impermeabilidade. Como requisitos básicos, são considerados:

- alta resistência mecânica;

- baixa relação água/cimento;
- consumo mínimo unitário de cimento;
- limitação da dimensão máxima característica do agregado;
- consistência seca;
- trabalhabilidade.

A trabalhabilidade do concreto depende da dimensão máxima característica do agregado gráudo, do teor de argamassa, do consumo de cimento e da consistência do concreto. É a propriedade que lhe permite ser transportado, lançado, distribuído, adensado e acabado sem sofrer danos quanto à homogeneidade da massa e à futura resistência mecânica e durabilidade do material endurecido.

Os agregados miúdos geralmente utilizados em pavimentos de concreto são pedrisco e areia, em dosagens adequadas de forma a gerarem uma curva granulométrica contínua, com grãos de praticamente todos os tamanhos previstos na série normal de peneiras, que envolvam os agregados gráudos (Brita 1 e Brita 2) e preencham os seus vazios quando estiverem na condição de compactados. A curva granulométrica adequada para este fim adota os limites da norma 7211 da ABNT (TABELA 7.16).

TABELA 7.16 – Limites granulométricos do agregado miúdo para concretos de pavimentação

<i>Abertura nominal</i>	<i>PORCENTAGEM RETIDA ACUMULADA, EM MASSA (NBR 7211)</i>			
(mm)	Zona 1 (muito fina)	Zona 2 (fina)	Zona 3 (média)	Zona 4 (grossa)
6,3	0 - 3	0 - 7	0 - 7	0
4,8	0 - 5	0 - 10	0 - 11	3 - 5
2,4	0 - 5	0 - 15	0 - 25	29 - 43
1,2	0 - 10	0 - 25	10 - 45	49 - 64
0,6	0 - 20	21 - 40	41 - 65	68 - 83
0,3	50 - 85	60 - 88	70 - 92	83 - 94
0,15	85 - 100	90* - 100	90* - 100	93 - 98
Módulo de Finura	1,35 - 2,28	1,71 - 2,85	2,11 - 3,45	3,25 - 3,87

* = para areias de brita, o limite pode ser de 80 %;

OBS: toleram-se até 5 % de variações (para mais ou para menos), em um só dos limites marcados ou distribuídos em vários deles.

A ABNT recomenda a granulometria da Zona 2 (fina) e 3 (média), sugeridas para casos em geral e ditadas pela observação de resultados práticos, que não se aplicam a regiões com falta ou carência de agregados miúdos, ou outros casos especiais. O uso da Zona 4 (grossa) no concreto de pavimentação é dependente de

acompanhamento da porosidade com o emprego de incorporadores de ar como aditivos (PITTA 1998a). As areias da Zona 1 são muito finas, exigindo maior consumo de água, e conseqüentemente de cimento, para uma mesma trabalhabilidade, o que requer correção com areias de brita ou aditivos plastificantes.

O uso de concretos de granulometria contínua é sempre aconselhável quando não se dispõe do domínio sobre a uniformidade granulométrica e da forma do agregado, o que é geralmente o caso das obras correntes (GODINHO & GROSSI 1998). Os concretos de granulometria descontínua são de difícil trabalhabilidade e muito sujeitos à segregação.

7.3.2.1. Materiais utilizados para elaboração do CS

A idéia desta pesquisa foi utilizar os resíduos *in natura*, sem grandes alterações na sua composição, para habilitar os resultados a pronto uso. Os materiais ensaiados foram os pós de pedra das minerações de brita com beneficiamento a seco (BR12 / BR17 / BR29 / BR31). Para efeitos comparativos, foi feita a simulação de uma areia de brita, obtida através da retirada dos pulverulentos por peneiramento em laboratório, para um dos casos selecionados (BR29)

De acordo com a metodologia descrita no capítulo 6 para os ensaios tecnológicos de concreto para pavimentação, foram estabelecidos alguns parâmetros que pudessem fornecer dados fundamentais dos pós de pedra, cujos resultados se encontram na **TABELA 7.17**. Para o uso dos resíduos em pavimentos de concretos simples, a composição granulométrica é o principal parâmetro a ser discutido, sendo que a mineralogia e composição química não são parâmetros determinativos.

TABELA 7.17 – Composição granulométrica dos resíduos (Série normal de peneiras)

Abertura (mm)	% retida (em peso)			
	BR12	BR17	BR 29	BR 31
9,5	0	0	0	0
4,8	15	26	26	1
2,4	22	33	33	5
1,2	59	64	59	46
0,6	72,5	74	69	60
0,3	89	89	74,5	68
0,15	92	92	92	84
Módulo de finura	3,50	3,78	3,50	2,44
Teor de pulverulentos (%)	7,69	8,54	8,38	15,99

As porcentagens segundo a série normal de peneiras foram calculadas por interpolação da curva de frequência acumulada, uma vez que os intervalos das peneiras recomendados e ensaiados não são exatamente os mesmos. Os valores de módulo de finura encaixam-se dentro dos limites das Zonas 3 e 4 (vide **TABELA 7.16**), mas os intervalos granulométricos estão mais próximos aos da Zona 4. Conforme pode ser visualizado na **FIGURA 7.7**, as curvas granulométricas dos resíduos estudados não satisfazem todos os intervalos dos limites estabelecidos pelas Zonas 3 e 4, mas compõem, em geral, uma curva contínua, distanciando dos limites nas porções mais grossas (+3,5 mm).

FIGURA 7.7 - Limites das Zonas 3 e 4 e curvas granulométricas dos resíduos

Em concretos tradicionais feitos com areia de brita (SBRIGHI NETO 1984), a sugestão é de não aplicar os traços de concretos convencionais utilizados com areia natural, devendo-se dosar racionalmente os componentes da nova mistura, pois as areias de brita apresentam textura superficial mais áspera e formas mais angulosas que as areias naturais, e exigem em peso, traços mais enriquecidos em cimento. Com base nesta sugestão, os traços elaborados para os resíduos de mineração de brita foram estudados previamente, e feitas dosagens com adequadas relações água/cimento e cimento/agregado.

KREMPEL *et al.* (1992) indica que o limite para a presença de material mais fino que 0,074 mm, em concretos sujeitos à abrasão, é de 3 % e de outros concretos é de 5 %. No caso de uso de areia de brita granítica como agregado miúdo, estes limites aumentam para 5 e 7 %, respectivamente. O uso de areia de brita sem lavar, com cerca de 13 % de pó, levou a um resultado de resistência à abrasão semelhante ao obtido com areia lavada. A redução do custo, nestes casos, foi de 7 % em relação ao uso de areias naturais.

O que se discute, a partir dos traços elaborados com pó de pedra e areia de brita, é que a quantidade de finos presentes não é um parâmetro limitante, desde que o teor de pulverulentos seja mantido constante.

7.3.2.2. Resultados obtidos

Os materiais estudados foram submetidos a alguns ensaios físicos de caracterização do agregado miúdo, tais como massa específica, massa unitária (estado solto) e teor de pulverulentos. Foi feito também outro ensaio de composição granulométrica, cujos resultados se encontram na **TABELA 7.18**.

TABELA 7.18 – Composição granulométrica dos resíduos (ABCP)

Abertura (mm)	% retida (em peso)			
	BR12	BR17	BR 29	BR 31
4,8	1	3	4	0
2,4	18	25	32	1
1,2	38	44	50	24
0,6	56	60	61	44
0,3	70	71	70	57
0,15	85	82	81	72
Módulo de finura	2,66	2,85	2,98	1,98
Teor de pulverulentos (%)	12,0	10,7	13,0	20,2
Massa específica	2,60	2,69	2,70	2,70
Massa unitária (estado solto)	1,50	1,54	1,60	n.d.

n.d.= não determinada

Os valores determinados pela ABCP para a composição granulométrica, módulo de finura e teor de pulverulentos foram bastante distintos dos valores obtidos quando da caracterização tecnológica dos resíduos realizado no Laboratório de Preparação de Amostras do GSA (IGc-USP). O principal fator para a diferença entre os valores foi o método de amostragem e seleção da alíquota para ser submetida ao ensaio de granulometria. Na ABCP foram separadas duas alíquotas de lado opostos da pilha cônica formada por toda a amostra. No Laboratório do IGc foi feito

quarteamento, com a redução da amostra de 100 kg em uma alíquota de 2 kg. Segundo o ensaio da ABCP, os intervalos e o módulo de finura estão mais próximos dos recomendados, Zonas 2 e 3, e as diferenças do comportamento granulométrico podem ser visualizadas na **FIGURA 7.8**.

FIGURA 7.8 - Diferença do comportamento granulométrico dos resíduos

A curva de Abrams, que determina o ponto ótimo da relação água/cimento de um concreto, foi estabelecida para o pó de pedra da mineração BR17 a partir da definição dos seguintes parâmetros:

- Teor de argamassa: admitido em 50 %, recomendado para o caso de usar apenas um tamanho de agregado graúdo (pedra 1);
- Umidade (água em materiais secos: admitida entre 8 e 10 %, uma vez que o agregado miúdo é derivado de britagem de rocha e possui maior superfície específica;
- Fator água/cimento: foram escolhidos três pontos: 0,4, 0,5 e 0,6.

Os resultados encontram-se na **TABELA 7.19**, e são ilustrados na **FIGURA 7.9**.

TABELA 7.19 – Dosagens do concreto simples (Curva de Abrams) - BR17

MATERIAL		TRAÇO		
Cimento (kg)		1	1	1
Agregado miúdo - Pó de Pedra (kg)		1,275	2,056	2,709
Agregado graúdo - Brita 1(kg)		2,375	2,949	3,637
Relação água / cimento		0,4	0,5	0,6
Umidade (H% - % em peso)		8,6	8,3	8,1
Abatimento (mm)		15	20	25
Consumo de cimento (kg/m ³ concreto)		462	356	292
Massa específica concreto fresco (g/cm ³)		2,36	2,36	2,36
Resistência à compressão simples (MPa)	3 dias	41,5	26,4	18,3
	7 dias	42,3	35,4	27,5
	28 dias	50,3	44,2	36,0

FIGURA 7.9 - Curva de Abrams, para três pontos água/cimento (BR17)

Com o estabelecimento da curva, encontrou-se o ponto ótimo da relação água/cimento em 0,52 (resistência mecânica à compressão aproximadamente 35 MPa aos 7 dias), valor este que guiou as dosagens com os demais materiais (TABELA 7.20 e FIGURA 7.10). Foram também realizados ensaios para um mesmo material, com e sem a fração -0,074 mm, ou seja, pó de pedra (BR29 caso 1) e areia de brita (BR29 caso 2).

TABELA 7.20 – Dosagens do concreto simples (CS)

MATERIAL		TRAÇO				
		BR12	BR29 (1)	BR29 (2)	BR31	ABCP
Cimento (kg)		1	1	1	1	1
Agregado miúdo - Pó de Pedra (kg)		1,869	1,713	1,836	1,600	2,011
Agregado graúdo - Brita 1 (kg)		3,108	2,939	3,072	2,817	3,110
Relação água/cimento		0,52	0,52	0,52	0,52	0,60
Umidade (H% - % em peso)		8,7	9,2	8,8	9,6	9,8
Abatimento (mm)		30	50	35	35	13
Consumo de cimento (kg/m ³ concreto)		355	374	359	387	343
Massa específica concreto fresco (g/cm ³)		2,35	2,29	n.d.	2,33	-
Módulo de ruptura à tração na flexão (MPa) - 14 dias		4,7	4,6	4,2	4,7	4,5 *
Resistência à compressão simples (MPa)	3 dias	24,6	20,6	29,2	23,7	-
	7 dias	30,0	26,9	34,9	27,5	-
	28 dias	39,1	34,0	n.d.	36,6	35,1

n.d. = não determinada; * = rompimento em 28 dias

FIGURA 7.10 - Resistências à compressão dos traços elaborados
(* = relação água/cimento 0,5)

Observa-se que os traços que apresentaram melhor desempenho, relativo à resistência mecânica à compressão simples e à tração na flexão, foram aqueles feitos com os resíduos das minerações BR12 e BR17, inclusive com os mais baixos consumos de cimento, muito embora o traço BR17 apresente uma menor relação água/cimento ($=0,50$). O traço elaborado com o resíduo BR31 também resultou em um material de bom desempenho, mesmo considerando a presença de 20 % de

pulverulentos, mas o consumo de cimento foi um pouco superior aos demais. O pó de pedra da mineração BR29 (caso 1) não atingiu o valor para resistência à compressão simples em 28 dias recomendado pela ABCP para algumas obras em execução, porém o seu uso é viável em outros casos, uma vez que indicou bons valores de resistência aos 7 dias.

O caso 2 da BR29, material que simula a areia de brita, apresentou resultados ainda melhores em 3 e 7 dias de idade, sugerindo que a retirada dos pulverulentos altera a qualidade do concreto, melhorando-o em resistência mecânica. O consumo de cimento também foi baixo (359 kg/m^3 de concreto). Este é um resultado indicativo, mas não conclusivo, da influência dos pulverulentos no uso dos resíduos de mineração de brita em concretos para pavimentação, uma vez que o material BR31, com 20 % de finos, também apresentou bom desempenho.

É expressiva a diferença entre as resistências mecânicas dos resíduos BR17 (resultado superior) e BR29 (resultado inferior), que apesar de apresentarem distribuição granulométrica do pó de pedra semelhante e mesmo tipo de rocha-fonte (granitos com textura porfirítica e matriz fanerítica média a fina) e índice de máficos (IM=25), pode ser provavelmente explicada pelas diferenças mineralógicas dos pós de pedra. Percebeu-se uma maior concentração de minerais máficos na BR29 em relação à BR17, sendo que a primeira é constituída predominantemente de biotita, e a segunda de piroxênio, anfibólio e flogopita. A fragilidade da estrutura cristalina das micas causa menor resistência no mineral, gerando pontos de fraqueza no concreto.

7.3.3. Pavimento de Concreto Compactado a Rolo (CCR)

Outro dos materiais de pavimentação que podem utilizar o pó de pedra é o concreto compactado com rolo (CCR), concreto rolado, concreto pobre ou magro, que é um concreto seco, de consistência dura e de trabalhabilidade tal que permita sua compactação por rolos compressores ou equipamentos semelhantes. O CCR contém um teor de cimento muito menor do que o usual nos concretos normalmente usados em pavimentação (consumo médio de 100 kg/m^3 ao invés de 380 kg/m^3 do concreto simples).

A resistência do CCR é cerca de 2 vezes menor que a dos concretos simples, e sua utilização vem sendo feita principalmente como sub-base em pavimentos rígidos. O concreto rolado deve conter uma quantidade de água que lhe confira

trabalhabilidade adequada à compactação por rolos compressores, em torno de 6 % em relação à massa dos materiais secos.

O agregado miúdo, no caso do concreto rolado, deve ser bem graduado, sem ausência de finos, e o teor é fixado por tentativa, antes do início da obra (PITTA 1998b). Em casos em que ocorre desagregação da mistura, ou má selagem da superfície da camada pronta, é necessária a adição de mais material fino.

Para relação cimento/agregado entre 1:12 e 1:20 e conteúdo total de água igual a 5,5 % (em massa), recomenda-se resistências à compressão simples entre 6 a 16 MPa aos 28 dias de idade, valores diminuindo com o aumento na quantidade de agregados. A **TABELA 7.21** indica as propriedades típicas do CCR, segundo PITTA (*op. cit.*).

TABELA 7.21 – Propriedades típicas do CCR

PROPRIEDADES	Relação cimento/agregado (em massa) 1:15
Resistência à compressão simples aos 28 dias (MPa)	11,0
Resistência à tração na flexão aos 28 dias (MPa)	2,5
Massa específica aparente máxima seca (kg/m ³)	2150 a 2300

7.3.3.1. Materiais utilizado para elaboração do CCR e resultados obtidos

Para o uso em CCR, foi realizado ensaio com apenas um dos pós de pedra (BR12). O agregado graúdo utilizado foi a Brita 1, e a relação foi 58 % de agregado graúdo e 42 % de agregado miúdo. A faixa granulométrica de referência dos agregados para o CCR encontra-se na **TABELA 7.22** e na **FIGURA 7.11**, onde se encontram também os valores obtidos para a mistura dos agregados utilizados.

TABELA 7.22 – Distribuição dos agregados no CCR

Abertura (mm)	% (em peso)					
	Brita 1	Pó de pedra	Mistura	% acumulada	Faixa de referência	
25	0	0	0	0	0	5
19	1	0	0,6	0,6	10	25
12,5	69	0	40,0	40,6	-	-
9,5	25	0	14,5	55,1	40	55
6,3	4	0	2,3	57,4	-	-
4,8	0	0,6	0,3	57,7	55	70
2,4	1	17,3	7,8	65,5	65	80
1,2	0	20,4	8,6	74,1	70	85
0,6	0	17,9	7,5	81,6	75	90
0,3	0	13,6	5,7	87,3	85	95
0,15	0	13,1	5,5	92,8	90	97
0,075	0	17,2	7,8	100,6	95	100
Módulo de finura	6,74	3,78	5,55	-	-	-

FIGURA 7.11 - Limites da composição do agregado recomendado para o CCR

Nota-se que apenas no intervalo entre 19 e 25 mm (pedra 2) a mistura não se encaixou na curva recomendada. O principal fator estabelecido na elaboração do CCR foi a umidade ótima, fixada em 5,5 %, e as demais características do traço são apresentadas na **TABELA 7.23**.

TABELA 7.23 – Dosagens do concreto compactado com rolo (CCR) - BR12

MATERIAL	TRAÇO
Cimento (kg)	1
Agregado miúdo - Pó de Pedra (kg)	9,348
Agregado graúdo - Brita 1 (kg)	12,91
Relação água/cimento	1,279
Umidade (H% - (% em peso)	5,5
Massa específica aparente seca (kg/m^3)	2600
Consumo de cimento (kg/m^3 concreto)	100
Massa específica concreto fresco (g/cm^3)	2,35
Resistência à compressão simples (MPa) 7 dias	7,3
Relação cimento/agregado	1: 22,25

Para avaliação dos resultados, uma vez que foi elaborado apenas um traço com o pó de pedra da mineração BR12, fez-se a comparação com casos da bibliografia (MENDES 1999, FUJIMURA *et al.* 1996, DNER 1992 - **TABELA 7.24**) e valores admitidos pela ABCP com materiais que estão sendo utilizados nas obras de pavimentação das marginais da Rod. Presidente Castello Branco, como sub-base.

TABELA 7.24 – Dosagens de CCR em casos da bibliografia

MATERIAL	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Cimento (kg)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Areia (kg)	14,85	7,43	3,71	-	-	-	-	-	-
Areia artificial * (kg)	-	-	-	-	5,9	0,00	0,00	-	-
Pó de pedra ** (kg)	-	7,43	11,14	14,85	-	5,9	6,23	-	5,05
Pedrisco (kg)	-	-	-	-	-	-	-	-	5,26
Brita 1 (kg)	3,18	3,18	3,18	3,18	2,85	2,85	3,93	-	6,11
Brita 2 (kg)	3,18	3,18	3,18	3,18	5,30	5,30	3,87	5,25	4,63
Bica 2 (kg)	-	-	-	-	-	-	-	15,76	-
Relação água/cimento	1,20	1,20	1,20	1,20	0,89	0,89	0,89	1,34	1,30
Relação cimento/agregado	1:21,21	1:21,21	1:21,21	1:21,21	1:14	1:14	1:14	1:22	1:21
Resistência à compressão (MPa) ***	-	3,75	5,55	6,15	8,4	6,8	8,3	6,8	5,9
Umidade ótima (%)	-	-	-	-	6,8	8,3	7,1	6,1	5,9
Consumo de cimento (kg/m ³)	100	100	100	100	150	150	150	100	100
Massa específica aparente (kg/m ³)	-	-	-	-	-	-	-	2,322	2,282

1 - Traços médios recomendados pelo DNER (1992) para a execução de sub-bases de pavimentos de CCR

2 a 4 - Traços elaborados por MENDES (1999) para CCR

5 a 7 - Traços elaborados por FUJIMURA et al (1996) para CCR

8 e 9 - Traços elaborados pela ABCP para as obras das marginais da Rod. Presidente Castello Branco

* segundo FUJIMURA et al. (1996), fragmento abaixo de 5/32"

** cada autor chama este material por um nome diferente, que nesta pesquisa consideramos -4,8 mm

*** rompimento em 7 dias.

Verificou-se que o resíduo da pedra BR12 apresentou excelente desempenho comparativamente aos casos de bibliografia, bem como ao recomendado pelo DNER, mesmo com uma relação cimento/agregado pouco superior. O desempenho não ficou restrito apenas à resistência mecânica, como também no consumo de cimento, e em suas consequências, melhores relações água/cimento e cimento/agregado.

CAPÍTULO 8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As operações em atividade na RMSP durante o período estudado (1998-2000) compreendem 39 minerações de brita e 66 minerações de areia. A produção de brita na RMSP está em torno de 18 milhões de m³, e a de areia próximo a 40 milhões de m³. Estima-se que a quantidade de **pó de pedra** (-4,8 mm) e **areia de brita** (-4,8 +0,074 mm) produzidos na RMSP é de cerca de 3,6 milhões de m³ e mais de 8 milhões de m³ de **finos de pedra** (-0,074 mm) e finos de mineração de areia.

Foram contemplados como resíduos nesta pesquisa a fração abaixo de 4,8 mm produzida pelas minerações de brita, com beneficiamento a seco ou à úmido, e nas minerações de areia, o material resultante da classificação / peneiramento de areia no circuito industrial, com granulometria, em geral, inferior a 0,15 mm.

O setor de pedras britadas encontra-se bem representado por um sindicato patronal (SINDIPEDRAS), que é voltado à centralização e organização de informações, e o acesso às empresas e aos dados foi facilitado por este mecanismo. No setor de areia, também há o agrupamento das empresas em um sindicato (SINDAREIA), porém com pouca adesão das mesmas e com menor disponibilidade de dados, devido à características das minerações, que variam segundo situação legal, porte do empreendimento e método de lavra e tipo de beneficiamento.

As litologias fonte de brita são rochas granitóides maciças, foliadas ou orientadas (maioria com textura porfirítica e matriz média a fina), e rochas gnáissicas (textura predominantemente granolepidoblástica). As rochas-fonte de areia são mantos de intemperismo de rochas graníticas, rochas sedimentares areno-argilosas e sedimentos de planícies aluviais.

A partir da compilação feita das unidades geológicas potencialmente exploráveis, integrada com as informações das reservas minerais requeridas junto ao DNPM e com dados atualizados do avanço da ocupação urbana, seria possível estabelecer um planejamento estratégico dos locais potenciais para instalação de novos empreendimentos minerários. Esta é uma sugestão para aprimoramento e utilização do levantamento realizado, sendo que tal nível de interferência não foi contemplado nesta pesquisa.

8.1. Minerações de Brita

Foram visitadas 20 minerações de brita, representando cerca de 50 % do total ativo, subdivididas em três grupos quanto ao tipo de beneficiamento: aquelas que operam a seco, com produção de pedrisco e pó de pedra, aquelas que operam a úmido, com a lavagem do pedrisco e produção de areia de brita e descarte dos finos de pedreira, e aquelas que operam a seco, mas possuem uma estrutura flexível e podem produzir areia de brita quando há demanda, ou pedrisco e pó, se este for o produto exigido pelo mercado. Os resíduos correspondem de 10 a 42 % da produção atual de pedras britadas.

Como resultado deste trabalho percebeu-se que a estrutura flexível para a produção de areia de brita pode vir a ser a grande distinção das pedreiras na RMSP, com maior oferta de produtos, minimização da quantidade de resíduos, e consequente otimização da produção, além de contribuir para o equacionamento do abastecimento de areia na RMSP. Acredita-se que este é o horizonte próximo na modernização do setor de agregados, com maior versatilidade da planta de beneficiamento.

As litologias tradicionais utilizadas como fonte de brita são rochas granitóides maciças, foliadas ou orientadas, e rochas gnáissicas. Verificou-se que a maioria das pedreiras da RMSP situam-se no domínio de rochas graníticas propriamente dito, e apenas 01 empreendimento localiza-se no domínio de gnaisses. Dentre as pedreiras visitadas, várias delas exploram verdadeiros gnaisses, sendo que estas unidades correspondem a corpos pequenos não detectáveis na escala do mapa geológico existente (1:50.000).

Em relação à textura da rocha, observa-se que a maioria dos litotipos graníticos encontrados é porfirítica com fenocristais de feldspato e matriz predominantemente máfica, média a fina, enquanto os gnaisses são geralmente granolepidoblásticos com matriz fina. As características texturais sugerem comportamento diferencial na britagem. Não há relação direta entre a quantidade de material fino passante na fração 0,074 mm e a quantidade de minerais máficos, embora estes se encontrem na matriz da rocha e o quartzo/feldspato nos pórfiros, com tendência a serem liberados nas frações maiores, enquanto os primeiros tendem a permanecer mais finos no processo de cominuição.

O pó de pedra das minerações visitadas apresenta comportamento granulométrico similar para as frações mais finas ($-0,074$ mm), com porcentagem em peso variando de 7 e 16 %. A variação se dá em função do tipo de rocha e textura, verificando-se uma maior quantidade relativa de finos para os gnaisses e para os granitos porfiríticos com matriz fanerítica fina. Nas frações mais grossas, observam-se maiores diferenças de comportamento, sendo que para todos os casos cerca de 95 % em peso é passante em 4,8 mm, e a maior porcentagem desta fração é gerada em granitos faneríticos a porfiríticos de matriz média.

Os resíduos de pedreira apresentam, em geral, alta rugosidade das partículas e grande aderência das menores às maiores. O arredondamento é baixo, decorrente do processo mecânico de quebra das partículas durante a britagem e os fragmentos apresentam angulosidade proeminente. Na maioria dos casos, as formas são prismáticas a tabulares, e o fator determinante para esta ocorrência é o tipo de britador utilizado pela mineração, tendo se mostrado menos relevante o tipo de rocha-fonte. Os grãos de quartzo e feldspato tendem a ser liberados abaixo de 0,6 mm, fração esta que também tende a concentrar maior quantidade de máficos.

Os resíduos de mineração de brita apresentaram variada composição química, com os teores de SiO_2 entre 58,9 e 72,0 %, teores de Al_2O_3 de 13,8 a 15,6 %, teores de álcalis ($\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) entre 9,69 e 12,7 %, e teores de $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ entre 2,09 e 7,61. O comportamento de alguns elementos químicos nas frações granulométricas tem a mesma tendência para todas as amostras. O teor de SiO_2 aumenta das frações maiores para as intermediárias, e decresce nas frações mais finas, possivelmente devido à granulação original dos minerais e seu comportamento durante o beneficiamento. Os teores de MgO e $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ aumentam à medida que diminui a granulometria, devido ao aumento de máficos nas porções mais finas. Os teores de Al_2O_3 e de álcalis, que se reportam a várias espécies minerais, não apresentam grande variação e não indicam nenhuma tendência a concentração na granulometria.

A correlação entre os teores de Fe_2O_3 e o índice de máficos (IM) apresentou uma tendência linear difusa, semelhante ao comportamento entre os finos menores que 0,074 mm e o mesmo índice. Os resíduos de gnaisses se destacam por apresentarem maiores teores de Fe_2O_3 (entre 4 e 6,5 %) e $\text{IM} = 35$. Dentre os granitos, os que possuem textura fanerítica média apresentam $\text{IM} = 10$ e teores de

ferro entre 1,9 e 3,1 %. Aqueles com textura porfírica e matriz média possuem teores de Fe_2O_3 entre 3 e 4 % e IM = 25. Já os granitos porfíricos com matriz fina estão com IM entre 15 e 25 e teores entre 3 e 5,3 %. Ressalta-se que o IM foi utilizado apenas com conotação descritiva, para quantificar os máficos presentes na amostra.

A concentração relativa de minerais micáceos e argilominerais nas frações mais finas, verificados por Difração de Raios-X, é uma tendência bem marcante para os resíduos das pedreiras. Foram identificados feldspatos potássicos e sódio-cálcicos, com incipiente caolinização. Os minerais máficos são do grupo das micas (biotita, flogopita, e menor presença de cloritóides) e se constituem nos principais portadores de ferro, em quantidades subordinadas a traços ocorrem piroxênios e anfibólios.

8.2. Minerações de Areia

Verificou-se a existência de vários tipos de empreendimentos voltados para a produção e abastecimento de areia na RMSP, além dos tradicionais portos e minerações. Existem as empresas produtoras de outros bens minerais, em que a areia participa como subproduto, caso em que se inserem as pedreiras e minerações de caulim ou argila para cerâmica. Algumas pedreiras estão aumentando a produção de areia de brita, com a lavagem do pedrisco, e desta forma, estes subprodutos tornam-se uma interessante fonte alternativa de abastecimento de areia na RMSP. Foram visitadas 14 empresas produtoras de areia, o que representa 21,5 % do total em atividade na RMSP.

Os resíduos de mineração de areia são constituídos por areia fina, silte e argila, significam cerca de 30 a 50 % da produção total (em volume), e são depositados em bacias de decantação. Os resíduos resultantes da classificação/peneiramento de areia (fração -0,15 mm), mostraram uma distribuição granulométrica que permitiu a separação de dois grupos, aqueles que apresentam mais de 35 % na fração 0,076 mm e menos de 15 % abaixo de 0,01 mm, e os demais, comportamento que reflete diretamente o tipo de mineração e beneficiamento. Pode-se ainda fazer outra subdivisão: aqueles casos que apresentam menos de 10 % acima de 0,076 mm e mais de 44 % abaixo de 0,01 mm, que se referem a minerações de areia a partir de rochas sedimentares.

Os resíduos estudados mostraram composição química sílico-aluminosa, com os teores de SiO_2 de 45,9 a 60,1 %, teores de Al_2O_3 entre 23,7 e 31,9 %, teores de álcalis ($\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) variando de 1,70 a 5,57 %, e teores de $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ entre 2,76 e 8,04. A mineralogia é basicamente quartzo-feldspática com pouca quantidade de micas e presença em proporções variadas de argilominerais (caolinita, illita). Como minerais máficos portadores de ferro foram identificados micáceos (flogopita, biotita, clorita).

8.3. Ensaio de aplicação

Para a realização de ensaios específicos de aplicação, os resíduos foram classificados segundo algumas frações granulométricas, de acordo com especificações dos setores industriais visados.

Ensaio específico para indústria cerâmica foram realizados com as frações -0,074 mm dos resíduos das minerações de brita e areia, fração granulométrica que representa o principal passivo produtivo. Verificou-se que a aplicação dos resíduos sem adição de matérias-primas mais plásticas só seria possível para um dos caso de resíduos de areia. Os materiais resultantes de britagem de rochas são muito enriquecidos em quartzo e precisariam de uma moagem prévia e introdução de argilas plásticas (argilas gordas), e face ao seu conteúdo de álcalis, são indicados como fundentes na indústria cerâmica.

Alguns dos resíduos de mineração de areia seriam melhor aplicados se acrescidos de pequena proporção de caulinita, para uso em cerâmicas brancas, ou de argilas com maiores teores de ferro para uso em revestimento e cerâmica estrutural; e em um dos casos, os resíduos nem precisam de aditivos para o uso nestes segmentos. Os finos não poderiam ser fonte de matéria-prima para o segmento de refratários devido à granulometria inadequada e baixa quantidade relativa de alumínio. Nas minerações de areia, este é o material que é descartado sem utilização e tem causado grandes problemas com sua acumulação, sendo que possui assembléia mineralógica interessante para o uso em cerâmica.

Para a indústria vidreira, as frações de interesse estão compreendidas entre 0,59 e 0,074 mm, que não é uma fração disponível no mercado. Os ensaios contemplaram o uso dos resíduos de mineração de brita e areia como fonte total de

alumínio, realizados apenas para os casos de menores teores de ferro ($< 4\%$). O uso como fonte de ferro na massa do vidro foi feita apenas com resíduos de mineração de areia.

Os resultados foram interessantes, quando aplicados como fonte de Al_2O_3 , dando uma coloração adequada para vidros de embalagem. Porém, quando usados como fonte de Fe_2O_3 geraram um vidro muito viscoso, pouco homogêneo e com baixa resistência mecânica. Os teores de álcalis e de alumínio são atrativos e para a aplicação destes materiais seria recomendada a diminuição dos teores de Fe_2O_3 por beneficiamento (separação magnética de média intensidade). Porém, não apenas estes fatores são levados em conta neste setor industrial, que é tradicionalista e pouco flexível quanto à qualidade das matérias-primas, mas também a constância da fonte fornecedora. Os resíduos são, portanto, considerados estratégicos para seu uso em vidros de embalagem.

Nos ensaios voltados para o uso dos resíduos na indústria da construção e pavimentação, o pó de pedra substituiu o agregado miúdo nos traços de concretos para pavimento, como base e sub-base em concreto simples (CS) e compactado a rolo (CCR). Estabelecida a curva de Abrams para um dos materiais, o traço para concreto simples usando os demais resíduos foi elaborado com o ótimo da relação água/cimento. Os resultados obtidos quanto ao consumo de cimento, resistência à compressão simples e tração na flexão e trabalhabilidade foram muito bons, melhores que os traços feitos para obras em andamento supervisionadas pela ABCP. O uso do pó de pedra pode ser usado para melhoria da qualidade dos concretos ensaiados, tanto para CS quanto para CCR. A aplicação das areias de brita deve ser melhor desenvolvida, pois foi verificada em apenas um dos casos, com resultados superiores aos do pó de pedra, em traços elaborados com os resíduos de uma mesma pedreira.

CAPÍTULO 9 - CONCLUSÕES

9. CONCLUSÕES

Os objetivos desta pesquisa foram atingidos, sendo que a real finalização do trabalho depende da assimilação dos resultados obtidos pelas empresas de mineração de agregados.

Pretendeu-se fornecer subsídios para maximizar o aproveitamento dos recursos minerais, e isto foi atingido com os resultados positivos obtidos para a aplicação industrial de resíduos descartados pelas minerações de brita e areia, bem como a partir da disponibilização de uma grande quantidade de informações a respeito dos materiais estudados.

Objetivou-se dar uma contribuição à sociedade em geral e informações que possibilitassem a utilização integral das reservas da mineração, bem como a redução de efeitos ambientais relacionados ao descarte ou acúmulo dos materiais residuais. Isto é viável, pois se for otimizada a utilização dos produtos das minerações, minimizando ou extinguindo o que é considerado resíduo, há um ganho ambiental com a redução dos impactos causados por estocagem e acumulação em pilhas e bacias de decantação.

Com o aproveitamento dos resíduos, poderia ser convertido o passivo ambiental contido nestes materiais, tornando-os produtos, com agregação de valor e utilização em fins mais nobres. Na pesquisa, foram criadas alternativas tecnológicas de abastecimento de matérias-primas minerais para alguns setores de indústrias de aplicação, especificamente as Indústrias Cerâmica, da Construção Civil e Pavimentação.

Os levantamentos desenvolvidos mostraram que para o setor de brita, existe um bom conhecimento da situação econômica e produtiva e estão disponibilizadas informações confiáveis, que puderam resultar em mapas de localização das pedreiras em atividade, levantamento de tipos de beneficiamento empregados e conhecimento das rochas-fontes de pedras britadas. No setor de areia isto não ocorre, as informações possuem um grau de qualidade menor, devido à características do setor. Isto dificultou a localização e o contato com as empresas, e foi necessária uma etapa de aquisição e compatibilização de informações, realizada às expensas dos estudos tecnológicos, que ficaram restritos quanto ao número de casos.

O nível de organização dos dois setores reflete também a estrutura para possibilidade da implementação do aproveitamento dos resíduos. Em geral, as pedreiras estão mais capacitadas a otimizar seus produtos, enquanto que apenas poucas minerações de areia estão em condições de aplicar os resultados desta pesquisa.

Os ensaios de caracterização tecnológica mostraram resultados indicativos das condições de aproveitamento dos resíduos em indústrias de aplicação, apresentando desempenhos similares ou superiores aos materiais tradicionalmente empregados. Mesmo em situações em que já ocorre um aproveitamento comercial dos resíduos, a pesquisa mostrou que pode ser feita uma aplicação mais nobre com valorização da matéria-prima mineral.

Ensaio preliminares para a indústria vidreira, visando aplicação de uma fração da areia de brita e pó de pedra, bem como dos resíduos não argilosos da mineração de areia, indicaram possibilidade tecnológica para o segmento de vidros de embalagem, sendo recomendada uma etapa adicional de beneficiamento para atingir melhores especificações. Problemas envolvidos se prendem à constância do produto fornecido, além de resistência do setor face à pouca flexibilidade de assimilação de matérias-primas não convencionais nos processos industriais. Outra questão é que esta fração não está disponível no mercado, e precisaria haver interesse das minerações de brita em separá-la do pó de pedra e areia de brita, ou das minerações de areia, em separá-la da fração argilosa. Por estas razões, a aplicação dos resíduos na indústria vidreira pode ser considerada apenas estratégica.

Alguns segmentos da indústria cerâmica são adequados para a assimilação dos finos de mineração de areia e finos de pedreira, tais como estrutural, revestimento e branca. Para os finos de pedreira, seriam necessárias adições de matérias-primas plásticas na composição da massa cerâmica, e os resíduos participariam como fundentes e/ou redutores de plasticidade. Nos casos dos finos de areia, devido às suas características e melhores desempenhos, as adições seriam mais no sentido de otimizar a massa cerâmica utilizando a maior quantidade possível de resíduo. Porém, não apenas os resultados tecnológicos comprovam a eficiência do uso dos resíduos, e sugere-se que sejam intensificadas as pesquisas para cada um dos casos das minerações de areia, contemplando outros fatores tais

como processo industrial, logística e econômico.

No estudo desenvolvido, conclui-se que a melhor destinação dos resíduos de pedreiras é na substituição de areias naturais em traços de concretos para pavimentação. A aplicação do pó de pedra em concreto simples e concreto compactado a rolo mostrou resistências mecânicas superiores às usuais, além da redução no consumo de cimento.

Do ponto de vista tecnológico, a aplicação de areia de brita mostrou resultados bastante interessantes. Do ponto de vista ambiental, se houver interesse no fornecimento de resíduos como agregado miúdo para pavimentação, a melhor alternativa é a produção de pó de pedra em relação à areia de brita, a qual pressupõe geração de finos de pedreira, e não resolve integralmente a problemática dos resíduos. Para as operações que já destinam sua produção para o fornecimento de areia de brita, e descartam os finos de pedreira, sugere-se o desenvolvimento da pesquisa do uso dos finos em alguns segmentos da indústria cerâmica. Esta aplicação também deve ser contemplada para as minerações com estrutura flexível que atendem ao mercado de areia e acumulam os resíduos finos em bacias de decantação.

Ressalta-se, finalmente, que o pó de pedra já é pontualmente utilizado em algumas obras, tais como marginais da Rod. Pres. Castello Branco e SP-79 em Sorocaba, mas existe pouca tradição no setor. A maior disseminação desta aplicação como redutor de custo de pavimentação nas obras de pavimentação na RMSP, especialmente nas obras do Rodoanel, seria a melhor forma de equacionar a aplicação dos resíduos de pedreira e as questões ambientais relacionadas.

CAPÍTULO 10 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (2000) *O pavimento de concreto no Brasil*. (15/07/00, http://www.abcp.org.br/cont_pavi.htm, comunicação verbal e notas).
- ABESC – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONCRETAGEM (1999) *Principais vantagens do pavimento de concreto*. (27/05/99, <http://www.abesc.org.br/vantagem.htm>)
- ABIVIDRO – ASSOCIAÇÃO TÉCNICA BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS AUTOMÁTICAS DE VIDRO (2000) *Especificações de matérias-primas para fabricação do vidro*. (15/03/00, <http://www.abividro.org.br/vidComp.htm>)
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987a) *Amostragem de agregados*. Rio de Janeiro, ABNT. 4p. (Procedimento NBR 7216).
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987b) *Agregados – determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro, ABNT. 3p. (Método de Ensaio NBR 7217).
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1992) *Apreciação petrográfica de materiais naturais, para utilização como agregado em concreto*. Rio de Janeiro, ABNT. 7p. (Procedimento NBR 7389).
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1993) *Materiais de pedra e agregados naturais*. Rio de Janeiro, ABNT. 4p. (Terminologia NBR 7225).
- AB'SABER, A. N. (1957) Geomorfologia do sítio urbano de São Paulo. *Boletim. Faculdade de Filosofia Ciências e Letras. Universidade de São Paulo. Série Geografia*, v.219, n.12.
- AB'SABER, A. N. (1980) Súmula geomorfológica do planalto paulistano. In: ASPECTOS GEOLÓGICO E GEOTÉCNICOS DA BACIA SEDIMENTAR DE SÃO PAULO, São Paulo, 1980. *Mesa Redonda*. São Paulo, ABGE-SBG. p. 33-36
- ALMEIDA, F.F.A. de (1958) O planalto paulistano. In: AZEVEDO, A. (org.). *A cidade de São Paulo*. São Paulo, Editora Nacional. p. 113-167.
- ALMEIDA, F.F.A. de (1964) Fundamentos geológicos do relevo paulista. *Boletim Instituto Geográfico e Geológico. São Paulo*, n. 41, p. 169-262.
- ALVES, W.A.; BALDO, J.B. (1998) O potencial da utilização de um resíduo argilosos na fabricação de revestimento cerâmico - parte II. *Cerâmica Industrial*, v. 2, n.5/8, p. 38-40.
- ANEFA – ASOCIACIÓN NACIONAL ESPAÑOLA DE FABRICANTES DE ARIDOS (2000) (15/03/00, <http://www.aridos.org/aneфа>)
- ANEPAC – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE ENTIDADES PRODUTORAS DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL (1999) *Produção de Agregados* (Comunicação verbal e notas)
- AREIA & BRITA (2000) Vale do Paraíba: maior região produtora de areia do país. *Associação Nacional de Entidades*, n. 10, p.5-19.
- BAUERMEISTER, K.H. (1996) *Distribuição e disponibilidade das áreas de areia para a construção civil, visando o abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo*. São Paulo, 109p. (Dissertação de Mestrado) - Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.

- BAUERMEISTER, K.H.; MACEDO, A.B.; LIOTTE, S.V. (1997) Areia de Construção civil: produção para a região metropolitana de São Paulo. *Brasil Mineral*, n. 152, p.20-24.
- BIGARELLA, W.; ALVES, F.(1998) Areia e brita: produção nacional é quase igual à do ferro. *Brasil Mineral*, n. 167, p. 16-19.
- CARUSO, L.G.; SBRIGHI NETO, C. (1983) Panorama básico para avaliação do desempenho de areia em construção civil. *Comunicação Técnica IPT*, n. 41, p. 1-9.
- CARVALHO, M.D. (1998) Vantagens e competitividade dos pavimentos rígidos. In: PÓS CONGRESSO PURDUE SOBRE PROJETO, AVALIAÇÃO, DESEMPENHO E REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS DE CONCRETO, 1, São Paulo, 1998. São Paulo, ABCP. p. 27-39.
- CÉRAMUS (1998) Feldspato... areia feldspática... um novo produto. *Boletim Informativo*, março/98. 5p.
- CHAVES, A.P.; PAUL, B. (1992) Aglomeração de rejeitos de fabricação de brita para sua reciclagem. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP*. Departamento de Engenharia de Minas, 5p.
- COUTINHO, J.M.V. (1980) *Carta geológica da região metropolitana de São Paulo 1:100.000*. São Paulo, EMPLASA. (2 mapas).
- CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (1978) *Plano diretor da mineração para a região metropolitana de São Paulo: diagnósticos e diretrizes*. São Paulo, CPRM. 2v.
- CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (1997) *Bases para o planejamento da mineração de areia na região metropolitana de São Paulo*. São Paulo, CPRM. 133p.
- CUCHIERATO, G.; SANT'AGOSTINO, L.M. (2000) Pó de Pedra: produção na região metropolitana de São Paulo (RMSP) e principais características. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, PRÁTICAS RECOMENDADAS, 3, São Paulo, 2000. *Meio Ambiente*. São Paulo, IBRACON, Comitê Técnico 206. p. 125.
- CUCHIERATO, G.; MOTTA, J.F.M.; CABRAL JR., C.; MELLO, I.S. de C., BRAGA, J.M.S. (1998) Possibilidades de aproveitamento cerâmico de resíduo silto-argiloso de mineração de areia: estudo de caso da Mineração Viterbo Machado Luz, SP. *Cerâmica*, v. 44, n. 285/286, p.51.
- DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (1992) *Manual de Pavimentos de Concreto Rolado*, v. 1, 156p.
- DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (1996) *Anuário Mineral Brasileiro*, v. 27.
- DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (1997) *Anuário Mineral Brasileiro*, v.28, p.171-174, 302-307.
- DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (2000) *Sumário Mineral*, v. 20, p. 23-24.
- EMPLASA – EMPRESA METROPOLITANA DE PLANEJAMENTO DA GRANDE SÃO PAULO (1984) *Sumário de dados da Grande São Paulo*.
- EMPLASA – EMPRESA METROPOLITANA DE PLANEJAMENTO DA GRANDE SÃO PAULO (1988) *Sismina – Sistema de Informações sobre a Atividade Mineral na Região Metropolitana de São Paulo*. São Paulo, EMPLASA. (Relatório interno).

- EMPLASA – EMPRESA METROPOLITANA DE PLANEJAMENTO DA GRANDE SÃO PAULO (2000) *Metrópoles em dados* (15/03/99, <http://www.emplasa.sp.gov.br/metrodados.htm>)
- FERREIRA, A.B. de H. (1986) *Novo dicionário Aurélio da língua portuguesa*. Rio de Janeiro, Nova Fronteira. 1838p.
- FERREIRA, G.C. (1996) *Estudo dos mercados produtor e consumidor de areia industrial no Estado de São Paulo*. Rio Claro, 142p. (Tese de Doutorado) - Instituto de Geociências da Universidade Estadual Paulista.
- FRANCESCONI, R. (1995) Areia: problemas e soluções para o Estado de São Paulo. *Brasil Mineral*, n. 136, pg 38-40.
- FRAZÃO, E.B.; PARAGUASSU, A.B.(1998) Materiais rochosos para construção. In: OLIVEIRA, A.M.S. & BRITO, S.N.A. de (1998) *Geologia de engenharia*. São Paulo, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. p. 331-342.
- FUJIMURA, F.; SOARES, L.; HENNES, W.T.; SILVA, M.A .R. (1995) O uso de finos de pedreiras de rochas gnáissicas e graníticas em substituição às areias naturais. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 29, Cuiabá, 1995. *Sessão Técnica*. Rio de Janeiro, ABPV. p. 147-156.
- FUJIMURA, F.; SOARES, L.; HENNES, W.T.; SILVA, M.A .R. (1996) Environmental issue and profitable uses of stone quarry fines. In: *Environmental Issues and waste management in energy and mineral production*. Cagliari, Digital/Universidade di Cagliari. v.2, p. 959-966.
- GODINHO, D.P.; GROSSI, L.C. (1998) Tecnologia dos concretos destinados à pavimentação rígida: materiais e especificações. In: PÓS CONGRESSO PURDUE SOBRE PROJETO, AVALIAÇÃO, DESEMPENHO E REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS DE CONCRETO, 1, São Paulo, 1998. São Paulo, ABCP. p. 111-132.
- GOES, M.A.C; LUZ, A.B.; POSSA, M.V. (1998) Amostragem. In: LUZ, A.B.; COSTA, L.S.N. (eds.). *Tratamento de minérios*. 2.ed. Ed. Cetem/ CNPq p. 17-57.
- GONÇALES, M.; ARTHUSO, V.; DEGUTI, R.; OHASHI, T. (2000) Produção de areia de brita com qualidade. *Areia & Brita. Associação Nacional de Entidades*, v. 2, n.10, p.20-25.
- GREGO, I.B.M. (1998) *Estudos dos efeitos da aditivação de argilas com tortas de filtração para produzir blocos de vedação*. Rio Claro, 108p. (Dissertação de Mestrado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- HALLACK, A.; SILVA, L.S. (1998) Estudo técnico e econômico de alternativas de pavimentação para rodovia de tráfego pesado. In: PÓS CONGRESSO PURDUE SOBRE PROJETO, AVALIAÇÃO, DESEMPENHO E REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS DE CONCRETO, 1, São Paulo, 1998. São Paulo, ABCP. p. 65-82.
- HASUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R. (1980) Origem e evolução da bacia sedimentar de São Paulo. In: ASPECTOS GEOLÓGICO E GEOTÉCNICOS DA BACIA SEDIMENTAR DE SÃO PAULO, São Paulo, 1980. *Mesa Redonda*. São Paulo, ABGE-SBG. p. 5-14.
- HASUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R.; COIMBRA, A.M. (1975) The ribeira folded belt. *Revista Brasileira de Geociências*, v.5, p. 257-266.
- IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (1987) *Estudo de viabilidade técnica para aproveitamento de sílica e feldspato contidos nos finos de pedreira*. São Paulo, IPT. (Relatório n. 25.143/87).
- IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (1990) Mercado Produtor Mineral do

Estado de São Paulo: levantamento e análise. São Paulo, IPT/PRÓ MINÉRIO. 188p. (Publicação n. 1822).

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (1996) *Adequação e controle da mineração na Bacia do Guarapiranga*: levantamento geológico e geomorfológico. São Paulo, IPT. (Relatório n. 34540/96). 2v.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (1998) Estudo do mercado de brita e cal na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). São Paulo, IPT. 19p. (Relatório, n. 36.614).

IWAKAMA, C.M.S.; CHAVES, A.P. (1993) Reciclagem de finos de areia para vidraria através da pelotização. In: CONGRESSO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MINAS, 2, São Paulo, 1993. *Anais*. São Paulo, EPUSP. v.2, p.1011-30.

JOHN, V.M. (1996) Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, São Paulo, 1996. *Anais*. São Paulo, ANTAC. p.21-30.

JULIANI, C. (1993) *Geologia, petrogênese e aspectos metalogenéticos dos grupos Serra do Itaberaba e São Roque na região das serras do Itaberaba e da Pedra Branca, NE da cidade de São Paulo, SP*. São Paulo, 803p. (Tese de Doutorado) - Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.

JULIANI, C.; SZABÓ, G.; CANDIA, M.A.F.(1996) *Petrologia de rochas metamórficas*. (Disciplina GMP 401, Notas de aula)

KAHN, H. (2000) Preparação de Amostras de Laboratório. In: *Caracterização tecnológica de matérias primas minerais*. (Curso promovido pelo LCT/POLI e CAPES/PADCT; Volume de Slides).

KIHARA, Y. (1998) *Mineralogia e petrologia técnica: os materiais*. (Disciplina GMP 398; Notas de aula).

KREMPEL, A.F.; CREVILARO, C.C; PAULON, V.A. (1992) Adição do pó ao concreto como fator econômico e de durabilidade. In: REUNIÃO DO IBRACON, 34., Curitiba, 1992. *Anais*. Curitiba, IBRACON. p. 193-206.

LAFARGE - LAFARGE CORPORATION(2000) *Aggregates* (15/03/00, http://www.lafargecorp.com/prd_ag.htm)

LE GRANULAT (1990) *Les granulats en Europe*. Paris, Publication de L'Union Nationale des Producteurs de Granulats (UNPG). 67p.

LIMA, M.R. de; MELO, M.S. de (1989) Palinologia de sedimentos da Bacia de São Paulo. In: WORKSHOP GEOLOGIA DA BACIA DE SÃO PAULO, São Paulo, 1989. *Coletânea de Comunicações*. São Paulo, SBG/NSP, p.35-37.

LIMA, M.R. de; MELO, M.S. de (1994) Palinologia de depósitos rudáceos da região de Itatiaia, Bacia de Resende – RJ . *Geonomos*, v.2, n.1, p. 12-21.

LIMA, M.R. de, MELO, M.S. de, COIMBRA, A.M. (1991) Palinologia de sedimentos da bacia de São Paulo, terciário do Estado de São Paulo, Brasil. *Revista IG*, v.12, n.1/2, p.7-20.

LIMA, M.R.; RICCOMINI, C.; SOUZA, P.A. (1994) Palinologia de folhelhos do Gráben de Casa da Pedra, Terciário do Estado do Rio de Janeiro, Brasil. *Acta Geologica Leopoldensia*, v.27, n.39/2, p. 485-504.

MELO, M.S. de (1997). Sedimentos fanglomeráticos da Bacia de Resende, RJ - a Formação Itatiaia. *Revista Universidade Guarulhos*, v. 2, p.33-38.

- MELO, M.S. de, PONÇANO, W.L., MOOK, W.G., AZEVEDO, A.E.G. (1987). Datações C14 em sedimentos quaternários da Grande São Paulo. In: CONGRESSO ABEQUA, 1, 1987, Porto Alegre. *Anais*. Porto Alegre, ABEQUA. p.427-436.
- MELO, M.S. de, VINCENS, A., TUCHOLKA, P. (1985). Contribuição à cronologia da Formação Itaquaquetuba - SP. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v.57, n.1, p.175-181.
- MENDES, K. da S. (1999) *Viabilidade do emprego de finos de basalto em concreto compactado a rolo*. São Paulo, 109p. (Dissertação de Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- MENDES, K. da S. (1997) Análise da morfologia de finos de pedreira de basalto através da técnica do MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 5, Penedo, Itatiaia, RJ, 1997. SBG-RJ/ES/SP. *Atas*. p.389-391.
- MINÉRIOS & MINERALES (1998) Quem é quem na Mineração Brasileira. Editora Universal, n. 233, p. 14-56.
- MINÉRIOS & MINERALES (1999) A produção das 1553 minas do Brasil. Editora Universal, n. 240, p. 6-49.
- MINÉRIOS & MINERALES (2000) Onde estão as 1611 minas do Brasil. Editora Universal, n. 250, p. 6-55.
- MOTTA, J.F.M. (2000) *As matérias-primas cerâmicas e o estudo de três casos de rochas fundentes*. Rio Claro, 185p. (Tese de Doutorado) - Instituto de Geociências da Universidade Estadual Paulista.
- MOTTA, J.F.M.; CABRAL JR, M.; TANNO, L.C. (1998) Panorama das matérias-primas utilizadas na Indústria de revestimentos cerâmicos: desafios ao setor produtivo. *Cerâmica Industrial*, v.3, n. 04/06, p.30-38.
- NSA – NATIONAL STONE ASSOCIATION (1999) *What aggregates do for America* (27/05/99, <http://www.aggregates.org/AgginAmer/agginam.htm>)
- NOVADUTRA (1999) Trecho da marginal de São Paulo ganha pavimento de concreto. *Boletim Informativo*, v.2, n. 21, p.2.
- OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. de (1998) *Geologia de engenharia*. São Paulo, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. 586p.
- OLIVITO, J.P.R. (2000) *Amostragem de resíduos de mineração de agregados e levantamento de potenciais usos*. São Paulo, CNPq/PIBIC. (Relatório Final de Iniciação Científica). Inédito.
- PALAZZO, S.A.; LEITE, J.F. (1998) Tecnologia de construção de pavimentos de concreto com equipamentos de última geração. In: PÓS CONGRESSO PURDUE SOBRE PROJETO, AVALIAÇÃO, DESEMPENHO E REABILITAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS DE CONCRETO, 1, São Paulo, 1998. São Paulo, ABCP. p. 89-100.
- PELOGGIA, A. (1998) *O homem e o ambiente geológico*. São Paulo, Editora Xama. 270p.
- PITTA, M.R. (1996) Pavimento de concreto: um moderno ovo de Colombo ? *Revista IBRACON*, junho/julho 1996, p.15-18.
- PITTA, M.R. (1998a) *Construção de pavimentos de concretos simples*. 3.ed. São Paulo, ABCP. 88p.
- PITTA, M.R. (1998b) *Concreto rolado: aplicações em pavimentação*. 7.ed. São Paulo, ABCP, 32p.

- PITTA, M.R.; CARVALHO, M.R. de; RODRIGUES, P.P.F. (1999) *Materiais para pavimentos de concreto simples*. 5.ed. São Paulo, ABCP. 165p.
- PITTA, M.R.; MARCIANO Jr., E. (1999) Construção e reabilitação de pavimentos: concreto e meio ambiente .In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., São Paulo, 1999. *Anais*. São Paulo, EPUSP. p. 68-83.
- PRACIDELLI, S.; MELCHIADES, F.G. (1997) Importância da composição granulométrica de massas para a cerâmica vermelha. *Cerâmica Industrial*, v.2, n.01/02, p.31-35.
- PRISZKULNIK, S.; GUEDES, S.A.; SBRIGHI NETO, C. (1972) Correlação entre as resistências do agregado graúdo e do concreto utilizando-se areia normal do Tietê e areia resultante da britagem do agregado. In: SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA, 4, São Paulo, *Anais*, APGA, p.333-384.
- PROJETO ALTO TIETÊ (1999) *Projeto de dados espaciais da bacia do Alto Tietê*. Volume explicativo (8 p.) e mapas (18).
- RICCOMINI, C. (1989) *O rift continental do sudeste do Brasil*. São Paulo, 256p. (Tese de Doutorado) - Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.
- RODRIGUEZ, S.K. (1998) *Geologia urbana da região metropolitana de São Paulo*. São Paulo, 171p. (Tese de Doutorado) - Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo).
- SABESP/CEPAS (1994) *Diagnóstico hidrogeológico da região metropolitana de São Paulo (RMSP)*. São Paulo, SABESP/CEPAS. (Relatório interno).
- SAITO, M.M. (1998) *Avaliação de ocorrências de feldspato do complexo granítico Três Córregos na região de Castro, PR, como matéria-prima cerâmica*. (Monografia de Trabalho de Formatura) 59p (+anexo)
- SAITO, M.M.; SANT'AGOSTINO, L.M. (1999) Avaliação do potencial de aplicação de granitóides do Complexo Três Córregos nas Indústrias Cerâmicas e Vidreiras. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 6., São Pedro, 1999. *Boletim de resumos*. São Paulo, SBG-NSP. p. 135.
- SANT'AGOSTINO, L.M. ; KAHN, H. (1997) Metodologia para a caracterização tecnológica de matérias primas minerais. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP*, n.69, p.1-29.
- SANT'AGOSTINO, L.M.; KAHN, H. (1998). Caracterização de granitos para aproveitamento como matéria prima para vidro. *Cerâmica* , v.44, n. 285/286, p.78-79.
- SANT'ANNA, L.G. (1999) *Geologia, mineralogia e gênese das esmectitas dos depósitos paleogênicos do rift continental do Sudeste do Brasil*. (Tese de Doutorado) - Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.
- SANTOS, P.S. (1989) *Ciência e tecnologia de argilas*. São Paulo, Edgard Blücher. 3v.
- SBRIGHI NETO, C. (1975) *A influência da natureza petrográfica da areia britada e seus fins em algumas propriedades do betão*. 102p. (Tese apresentada a concurso de especialista do Laboratório Nacional de Engenharia Civil) - Lisboa.
- SBRIGHI NETO, C. (1984) Areia granítica pode substituir areia convencional na produção de concreto. IPT (Comunicação técnica n. 140). 3p.
- SBRIGHI NETO, C. (1986) O uso de pó de pedra em concreto. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE AGREGADOS, 1, São Paulo, 1986 *Anais*. São Paulo, EPUSP. p. 143-146.
- SBRIGHI NETO, C.; TANGO, C.E.S. (1987) Comparação de desempenho de agregados

- para cimento: metodologia e exemplos práticos. In: COLOQUIO "AGREGADOS PARA CONCRETO". IBRACON, Pub 18.5, 17p.
- SBRIGHI NETO, C.; SOARES, L. (1996) The use of crushing rock dust in Portland Cement concrete production. In: ENVIRONMENTAL ISSUES AND WASTE MANAGEMENT IN ENERGY AND MINERAL PRODUCTION. Cagliari, Italy. v.2, p. 1041-1048.
- SCOTT, D (1989) Inventário e planejamento de agregados em Ontário, Canadá. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE MINERAÇÃO EM ÁREA URBANA, São Paulo, 1989. *Anais*. São Paulo, Pró-Minério. p.109-116.
- SEADE – FUNDAÇÃO SISTEMA ESTADUAL DE ANÁLISE DE DADOS (2000) Informações dos municípios paulistas (15/03/00, <http://www.seade.gov.br>)
- SINDAREIA – SINDICATO DA INDÚSTRIA DE EXTRAÇÃO DE AREIA DO ESTADO DE SÃO PAULO (1999) *Produção de areia*. (Comunicação verbal e notas).
- SINDIPEDRAS – SINDICATO DA INDUSTRIA DE MINERAÇÃO DA PEDRA BRITADA DO ESTADO DE SÃO PAULO (1999) *Produção de brita*. (Comunicação verbal e notas).
- SINDIPEDRAS – SINDICATO DA INDUSTRIA DE MINERAÇÃO DA PEDRA BRITADA DO ESTADO DE SÃO PAULO (2000) *Produção de brita*. (Comunicação verbal e notas).
- SOARES, L.; MENDES, K. da S. (1999) Aproveitamento de finos de pedreiras. In: SEMINÁRIO MARKETING & TECNOLOGIA EXPO'99, São Paulo, 1999. São Paulo, SOBRATEMA, São Paulo. 20p.
- SOARES, L. ; FUJIMURA, F.; HENNIES, T; SILVA, M.A.R. (1996) Change of natural sand by fine crushing material of granitic and gneissic rock quarries. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MINE PLANNING AND EQUIPMENT SELECTION, 5., São Paulo, 1996. *Proceedings*. Rotterdam, Balkema. p.701-706.
- STRECKEISEN, A.L. (1976) To each plutonic rock its proper name. *Earth-Science Reviews*, p.121-33.
- TAKIYA, H. (1991) *Aplicação de métodos quantitativos espaciais a dados geológicos da Bacia de São Paulo*. São Paulo, 109 p. (Dissertação de Mestrado) - Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.
- TAKIYA, H. (1997) *Estudo da sedimentação neogênica-quaternária no Município de São Paulo: caracterização dos depósitos e suas implicações na Geologia Urbana*. São Paulo, 152p. (Tese de Doutorado) - Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.
- TERRA, L.E.M. (2000) Finos de pedreira para confecção de concreto estrutural - práticas recomendadas. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL: PRÁTICAS RECOMENDADAS, 3., São Paulo, 2000. *Meio Ambiente*. IBRACON, Comitê Técnico 206. p. 65.
- UEPG – Union Nationale des Producteurs de Granulats (2000) *What are aggregates ?* (15/03/00, <http://www.uepg.com/agg01.htm>)
- ZANCHETTA, L.M.; SOARES, L. (2000) Uso de areias resultantes da britagem de rochas na elaboração de argamassas. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, PRÁTICAS RECOMENDADAS, 3., São Paulo, 2000. *Meio Ambiente*. São Paulo, IBRACON. Técnico 206. p. 127.