

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E MATERIAIS (PPGE3M)

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE REJEITOS DE CARVÃO MINERAL NA
FABRICAÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO EM
SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO MIÚDO NATURAL

Cassiano Rossi dos Santos

Porto Alegre (RS), setembro de 2012.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E MATERIAIS (PPGE3M)

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE REJEITOS DE CARVÃO NA FABRICAÇÃO DE
BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO EM SUBSTITUIÇÃO AO
AGREGADO MIÚDO NATURAL

Cassiano Rossi dos Santos

Orientador: Prof^a. Dra. Rejane Maria Candiota Tubino

Co-orientador: Prof. Dr. Ivo André Homrich Schneider

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alexandre Silva de Vargas – FEEVALE

Prof. Dr. Jean Carlo Salomé dos Santos Menezes - UNOESC

Prof. Dr. André Zingano - UFRGS

Trabalho de Conclusão do Curso de Mestrado em Engenharia como requisito parcial à
obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre (RS), setembro de 2012.

Este Trabalho de Conclusão foi analisado e julgado adequado para a obtenção do título de mestre em ENGENHARIA e aprovado em sua forma final pelos orientadores e pelo coordenador do Doutorado em Engenharia, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof^a. Dra. Rejane Maria Candiota Tubino
Orientador
Escola de Engenharia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Ivo André Homrich Schneider
Co-orientador
Escola de Engenharia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker
Coordenador

Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Banca Examinadora

Alexandre Silva de Vargas
Universidade FEEVALE/RS – Departamento de Engenharia Civil

Jean Carlo Salomé dos Santos Menezes
Universidade do Oeste de Santa Catarina (UNOESC) – Departamento de Engenharia Sanitária
e Ambiental

André Zingano
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – Departamento de Engenharia de Minas

Dedico à minha família.

AGRADECIMENTOS

- Aos meus pais e à minha irmã;
- A empresa Carbonífera Criciúma S.A. pela colaboração, em especial ao Carlos Schneider;
- Aos meus orientadores, professora Rejane Tubino e Ivo Schneider, pela amizade e pela valorosa contribuição técnica e pessoal;
- A toda equipe da secretaria do PPGE3M;
- Ao LAPROM, em especial ao professor Carlos Sampaio por disponibilizar a infraestrutura do laboratório e ao Gerson, por toda o auxílio e contribuição na etapa de beneficiamento e caracterização do rejeito;
- Ao professor Alexandre Vargas, por toda a contribuição dada nos estágios iniciais da pesquisa;
- Aos bolsistas de iniciação científica Arthur Camargo e Rodrigo Kanno pelo auxílio na execução dos experimentos;
- Ao LTM por disponibilizar os equipamentos para britagem do rejeito, em especial ao professor Rafael Teixeira e ao Alex;
- Ao colega Juarez Amaral pelo auxílio e contribuição técnica durante todo o desenvolvimento do trabalho;
- Aos colegas Luciana Machado, Jean Menezes, Rodrigo Almeida, Ivana Dandolini pelo auxílio no estudo de predição da DAM;
- Aos bolsistas Renan, Jéssica e Pedro Ivo;
- A todas a equipe do LEAMet;
- Ao NORIE, em especial à professora Angela Masuero, por disponibilizar a infraestrutura do laboratório.
- Aos colegas Luciana Cordeiro, Lais Zucchetti, Anderson, Eni e João, do NORIE, pelo auxílio durante a fabricação dos blocos de concreto;
- Um agradecimento especial ao Airton, ao Gilmar e ao professor Daniel Pagnussat, do NORIE. Sem essa contribuição esse trabalho não seria possível;
- Ao centro de Microscopia da UFRGS;
- Ao CIENTEC pelos ensaios de resistência à compressão e à abrasão, em especial à Ana Carolina Kamura De Lucca, Fernanda Pereira e ao Paulo;
- À Gelsa Navarro pelo auxílio na análise elementar;
- A todas os colegas que de qualquer forma contribuíram com o trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS.....	11
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	14
RESUMO	18
ABSTRACT	19
1 INTRODUÇÃO	20
1.1 OBJETIVO GERAL.....	22
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
2 REVISÃO DA LITERATURA	24
2.1 PRODUÇÃO DE CARVÃO MINERAL E SEUS IMPACTOS AMBIENTAIS	24
2.1.1 <i>Beneficiamento de Carvões</i>	25
2.1.2 <i>Impactos Ambientais da Mineração de Carvão</i>	28
2.1.3 <i>A Drenagem Ácida de Minas</i>	32
2.1.4 <i>Reações de oxidação e geração de acidez</i>	32
2.1.5 <i>Controle da drenagem ácida de mina</i>	33
2.2 PREVISÃO DA GERAÇÃO DA DRENAGEM ÁCIDA DE MINA	35
2.2.1 <i>Ensaio estáticos</i>	36
2.2.2 <i>Ensaio cinéticos</i>	41
2.3 CONCRETO.....	44
2.4 BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO.....	45
2.4.1 <i>Características desejadas dos blocos de concreto para pavimentação</i>	48
2.4.2 <i>Fatores determinantes na qualidade dos blocos de concreto para pavimentação</i>	50
2.5 PROCESSO DE SOLIDIFICAÇÃO/ESTABILIZAÇÃO DE RESÍDUOS	53
2.6 AGREGADOS	59
2.6.1 <i>Influência dos agregados miúdos sobre a qualidade do concreto</i>	60
2.6.2 <i>Parâmetros físicos</i>	63
2.7 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	65
2.7.1 <i>Utilização de resíduos sólidos de mineração de carvão na construção civil</i>	68
2.7.2 <i>Resíduos sólidos na produção de blocos de concreto para pavimentação</i>	77
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	81
3.1 O RESÍDUO UTILIZADO NO ESTUDO	82
3.2 COLETA DE AMOSTRAS	84
3.3 CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA E DENSIMÉTRICA DO REJEITO	85
3.4 OBTENÇÃO DO AGREGADO MIÚDO RECICLADO (AMR).....	85
3.4.1 <i>Homogeneização e quarteamento</i>	86

3.4.2	<i>Separação manual lodo-rejeito</i>	86
3.4.3	<i>Ensaio de afunda-flutua</i>	86
3.4.4	<i>Ajuste granulométrico</i>	88
3.5	CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO RECICLADO (AMR).....	88
3.6	ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DO REJEITO DE CARVÃO NA FABRICAÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO	90
3.6.1	<i>Planejamento Experimental</i>	91
3.6.2	<i>Produção dos blocos de concreto</i>	98
3.7	AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ACIDEZ	110
3.7.1	<i>Ensaio estático de contabilização de ácidos e bases</i>	110
3.7.2	<i>Ensaio cinético em células úmidas</i>	112
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	115
4.1	COMPOSIÇÃO DENSIMÉTRICA E GRANULOMÉTRICA DO REJEITO BRUTO.....	115
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO RECICLADO (AMR).....	117
4.3	ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DO REJEITO DE CARVÃO NA FABRICAÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO	124
4.3.1	<i>Resistência à compressão</i>	124
4.3.2	<i>Resistência à abrasão</i>	128
4.3.3	<i>Absorção de água</i>	132
4.3.4	<i>Dificuldades encontradas durante a produção dos blocos de concreto</i>	134
4.4	AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ACIDEZ	136
4.4.1	<i>Ensaio estático</i>	136
4.4.2	<i>Ensaio cinético</i>	137
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	145
6	ESTUDOS FUTUROS	148
7	REFERÊNCIAS	150

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama dos produtos de mineração do carvão (Schneider, 2006)	25
Figura 2: Curvas de separabilidade de um carvão (Tavares e Sampaio, 2005).....	27
Figura 3: Efeito do tamanho de partícula na precisão de separação no beneficiamento de carvão (Tavares e Sampaio, 2005).	28
Figura 4: Rejeitos de carvão dispostos na região carbonífera de Santa Catarina (cortesia de Edson Maciel, 2008).....	29
Figura 5: Geração da DAM.	29
Figura 6: Produção de rejeitos de carvão na região carbonífera de Santa Catarina.	30
Figura 7: Tipologias de blocos de concreto intertravados (ABCP, 2009).....	48
Figura 8: Tecnologia dos blocos de concreto para pavimentação (Schackel, 2003).	51
Figura 9: Bloco obtido a partir de concreto produzido com excesso de água (Pagnussat, 2004).	52
Figura 10: Avaliação visual comparativa da forma das partículas. (a) obtida pela medida da esfericidade e rotundidade. (b) baseada em observações da morfologia (Hewlett, 2003).	64
Figura 11: Tipos de concreções piríticas presentes na camada de carvão (Costa et al., 2001).73	
Figura 12: Digitalização de uma fotomicrografia eletrônica de ataque interno por sulfato em concreto da região do Golfo Árabe (Hewlett, 2003)	74
Figura 13: Efeitos deletérios devido à presença de carvão no agregado (Hewlett, 2003).....	76
Figura 21: Detalhes da metodologia estabelecida.	82
Figura 15: Vista superior do Módulo de Rejeitos da Carbonífera Criciúma (Cortesia: Carlos Henrique Schneider, 2009).....	83
Figura 16: Fluxograma do processo de beneficiamento utilizado na Carbonífera Criciúma. ..	84
Figura 17: Detalhes da coleta da amostra do rejeito bruto.~	85
Figura 18: Procedimento experimental do ensaio afunda-flutua.....	87
Figura 19: Ordem de execução das datas em que os blocos de concreto para pavimentação foram moldados.	95
Figura 20: Curva granulométrica da areia média natural e os limites estabelecidos na NBR 7211 (ZUI – limite inferior, zona utilizável; ZOI – limite inferior, zona ótima; ZOS – limite superior, zona ótima; ZUS – limite superior, zona utilizável).....	100
Figura 21: Betoneira de eixo vertical utilizada na produção do concreto.	102
Figura 22: Visão lateral da vibro-prensa e detalhe dos moldes.	102
Figura 23: Blocos de concreto obtidos com o segundo traço utilizado (estado fresco e endurecido).	105
Figura 24: Blocos com 0, 25, 50, 75 e 100% de substituição do agregado miúdo natural por AMR.	107
Figura 25: Detalhes do ensaio de resistência à compressão.	108
Figura 26: Equipamento utilizado no ensaio de resistência à abrasão.	109

Figura 27: Células úmidas utilizadas para realização dos ensaios cinéticos de previsão da drenagem ácida de mina.	113
Figura 28: Detalhes dos materiais submetidos ao ensaio.	113
Figura 29: Classificação granulométrica do rejeito bruto.	115
Figura 30: Classificação granulométrica da fração com densidade entre 2,4 e 2,8 antes da britagem.	117
Figura 31: Agregado miúdo reciclado de rejeitos de carvão.	117
Figura 32: Classificação granulométrica da fração com densidade entre 2,4 e 2,8 (AMR) após britagem.	118
Figura 33: Curva granulométrica do AMR obtido e os limites estabelecidos na NBR 7211 (ZUI – limite inferior, zona utilizável; ZOI – limite inferior, zona ótima; ZOS – limite superior, zona ótima; ZUS – limite superior, zona utilizável).	118
Figura 34: Fotografia de grãos de diferentes granulometrias do AMR.	119
Figura 35: Resultados da Análise por FRX no AMR.	120
Figura 36: Resultado da análise de difração de raios-x no material de interesse.	120
Figura 37: Ranking dos ânions e cátions comuns que podem acelerar ou de retardar a hidratação de cimento Portland (Dole apud Mattus e Gilliam, 1994).	122
Figura 38: Resistência à compressão dos blocos com diferentes teores de AMR ao longo dos períodos de cura.	125
Figura 39: Percentual de resistência adquirida entre os intervalos dos tempos de cura avaliados.	126
Figura 40: Índice de desgaste por abrasão dos blocos com diferentes teores de AMR ao longo dos períodos de cura.	129
Figura 41: Gráfico de barras indicando o índice de desgaste por abrasão médio obtido para cada porcentagem de substituição.	132
Figura 42: Gráfico de barras indicando a absorção de água média obtido para cada porcentagem de substituição.	134
Figura 43: Formação de grumos durante a mistura dos materiais.	135
Figura 44: Problemas de acabamento nas superfícies dos blocos.	136
Figura 45: Valores de pH nos lixiviados das células contendo amostras de rejeito bruto, AMR e de blocos contendo 0%, 50% e 100% de AMR em substituição ao agregado miúdo natural.	138
Figura 46: Valores de potencial redox nos lixiviados das células contendo amostras de rejeito bruto, AMR e de blocos contendo 0%, 50% e 100% de AMR em substituição ao agregado miúdo natural.	139
Figura 47: Valores de acidez nos lixiviados das células contendo amostras de rejeito bruto, AMR e de blocos contendo 0%, 50% e 100% de AMR em substituição ao agregado miúdo natural.	140
Figura 48: Valores de alcalinidade total nos lixiviados das células contendo amostras de rejeito bruto, AMR e de blocos contendo 0%, 50% e 100% de AMR em substituição ao agregado miúdo natural.	140

Figura 49: Valores de ferro nos lixiviados das células contendo amostras de rejeito bruto, AMR e de blocos contendo 0%, 50% e 100% de AMR em substituição ao agregado miúdo natural.	141
Figura 50: Valores de alumínio nos lixiviados das células contendo amostras de rejeito bruto, AMR e de blocos contendo 0%, 50% e 100% de AMR em substituição ao agregado miúdo natural.	141
Figura 51: Valores de manganês nos lixiviados das células contendo amostras de rejeito bruto, AMR e de blocos contendo 0%, 50% e 100% de AMR em substituição ao agregado miúdo natural.	142
Figura 52: Valores de zinco nos lixiviados das células contendo amostras de rejeito bruto, AMR e de blocos contendo 0%, 50% e 100% de AMR em substituição ao agregado miúdo natural.	142
Figura 53: Valores de cálcio nos lixiviados das células contendo amostras de rejeito bruto, AMR e de blocos contendo 0%, 50% e 100% de AMR em substituição ao agregado miúdo natural.	143
Figura 54: Valores de sulfato nos lixiviados das células contendo amostras de rejeito bruto, AMR e de blocos contendo 0%, 50% e 100% de AMR em substituição ao agregado miúdo natural.	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Métodos de controle da drenagem ácida de minas	34
Tabela 2: Critérios do método ABA para identificação do potencial de geração de acidez dos materiais – NPR.....	39
Tabela 3: Critérios do método ABA para identificação do potencial de geração de acidez dos materiais – NPR.....	39
Tabela 4: Características dos testes ABA padrão e modificado.....	40
Tabela 5: Informações sobre os principais métodos estáticos.....	40
Tabela 6: Informações gerais sobre os principais tipos de ensaios cinéticos.....	44
Tabela 7: Fatores relacionados à obtenção das qualidades essenciais ao concreto.....	45
Tabela 8: Reagentes ligantes típicos.....	54
Tabela 9: Vantagens e desvantagens das técnicas de S/S baseadas na utilização do cimento ..	56
Tabela 10: Análises requeridas para verificação da viabilidade de aplicação da tecnologia de S/S através do cimento.....	58
Tabela 11: Influência das características físicas dos agregados nas propriedades do concreto.....	61
Tabela 12: Regulamentações em vigor nos estados membros europeus sobre o uso benéfico de resíduos como material de construção.....	67
Tabela 13: Aplicações de rejeitos de carvão mineral.....	69
Tabela 14: Reações predominantes de oxidação da pirita e da pirrotita em meio aquoso e suas respectivas variações de volume. Reações da pirrotita equilibradas para $x = 0,125$	75
Tabela 15: Estudos de utilização de resíduos na fabricação de blocos de concreto para pavimentação.....	78
Tabela 16: Reagentes usados para o ensaio de afunda-flutua.....	87
Tabela 17: Índices de priorização dos fatores controláveis.....	93
Tabela 18: Resumo do programa experimental.....	97
Tabela 19: Características do cimento CP-V-ARI-RS utilizado.....	99
Tabela 20: Caracterização física da areia média utilizada.....	99

Tabela 21: Distribuição granulométrica da areia fina.	100
Tabela 22: Distribuição granulométrica e caracterização física da brita zero utilizada.	101
Tabela 23: Primeiro traço, em massa, utilizado na determinação do traço referência.	105
Tabela 24: Segundo traço, em massa, utilizado como traço referência.	105
Tabela 25: Relação água/cimento utilizada em cada porcentagem de substituição.	107
Tabela 26: Volume e normalidade de HCl a ser adicionado na determinação do NP.	110
Tabela 27: Métodos de análise, equipamentos e limites de detecção dos parâmetros analisados nos lixiviados das células úmidas.	114
Tabela 28: Classificação densimétrica do rejeito bruto.	116
Tabela 29: Resultado da análise elementar do AMR.	121
Tabela 30: Resultados da análise imediata e formas de enxofre no AMR.	122
Tabela 31: Resultados do ensaio de lixiviação.	123
Tabela 32: Resultados do ensaio de solubilização.	123
Tabela 33: Resistência à compressão média (f_c), desvio padrão (σ) e o coeficiente de variação (C.V.) dos dados obtidos nos ensaios de resistência à compressão.	124
Tabela 34: Tabela ANOVA para resistência à compressão.	127
Tabela 35: Resultado da ANOVA para os dados de resistência à compressão.	127
Tabela 36: Resistência à abrasão média, expressa pelo índice de desgaste por abrasão médio (mm), desvio padrão (σ) e o coeficiente de variação (C.V.) dos dados obtidos nos ensaios de resistência à abrasão.	128
Tabela 37: Percentual de redução do índice de desgaste por abrasão entre os intervalos dos tempos de cura avaliados.	130
Tabela 38: Tabela ANOVA para resistência à abrasão.	131
Tabela 39: Resultado da ANOVA para os dados de resistência à abrasão.	131
Tabela 40: Absorção de água média, desvio padrão (σ) e o coeficiente de variação (C.V.) dos dados obtidos nos ensaios de absorção de água.	132
Tabela 41: Tabela ANOVA para absorção de água.	133
Tabela 42: Resultado da ANOVA para os dados de absorção de água.	133

Tabela 43: Resultados dos ensaios estáticos do rejeito bruto, do AMR e dos blocos 0% (referência), 50% e 100% de substituição. 137

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

\cong - Aproximadamente igual

(α) – Teor de argamassa

μg - Micrograma

σ – Desvio padrão

a/c – água/cimento

ABA - *Acid Base Accounting*

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AMR – Agregado miúdo reciclado

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

ANOVA – Análise de varância

AP - *Acid Generation Potential*

APHA - *American Public Health Association*

ASTM - *American Society for testing and Material*

BCP – Bloco de concreto para pavimentação

BMD - *Building Material Decree*

b.s. – Base seca

C₃S - Silicato tricálcico

CaCO₃ - Carbonato de cálcio

CCSA – Carbonífera Criciúma S.A.

CIB - *International Council for Building Research Studies and Documentation*

CIENTEC - Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul

CP - Cimento Portland

cp's – Corpos-de-prova

CP-V-ARI-RS - Cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos

C.V. – Coeficiente de variação

DAM – Drenagem ácida de minas

DMAE - Departamento Municipal de Água e Esgoto de Porto Alegre

DRX – Difração de raios-x

EC – Comunidade europeia

Eh – Potencial redox

EPA - *U.S. Environmental Protection Agency*

EUA – Estados Unidos da América

fc – Resistência à compressão

FeS₂ – Dissulfeto de ferro

Fe(OH)₂⁺ - Hidróxido ferroso

FRX – Fluorescência de raios-x

GDL – Graus de liberdade

hp – Cavalos de potência

ICP-OES - espectrometria de emissão óptica em plasma com acoplamento indutivo

IDA – Índice de desgaste por abrasão

IPAT - Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas

ISO - *International Organization for Standardization*

JICA - *Japan International Cooperation Agency*

kfc – Quilograma-força

LEAMet - Laboratório de Estudos Ambientais para Metalurgia

m/m – massa/massa

MEND - *Mine Environmental Neutral Drainage*

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

MME - Ministério de Minas e Energia

MPa - Megapascal

mV - Milivolts

NAG - *Net Acid Generation*

NBR - Norma brasileira

ND – Não detectado

NGM - *Near Gravity Material*

NNP - Potencial de neutralização líquido

NORIE - Núcleo Orientado para Inovação da Edificação

NP – Potencial de neutralização

NPR - Razão do potencial de neutralização

OCDE - *Organization for Economic Co-operation and Development*

pH – Potencial hidrogeniônico

PFA - Cinza de combustível pulverizado sinterizada

RC – Resistência a compressão

RILEM - *International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures*

ROM - Carvão *run-of-mine*

SDM - Secretaria de Estado de Desenvolvimento e Meio Ambiente

S/S – Solidificação/Estabilização

TKN – Nitrogênio total Kjeldahl

UTM - Sistema Universal Transverso de Mercator

VSI - Britador do tipo giroférico de impacto vertical

RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi estudar a utilização de rejeito de carvão, proveniente da região carbonífera de Santa Catarina, na fabricação de blocos de concreto para pavimentação em substituição ao agregado miúdo natural. Produziu-se um agregado miúdo reciclado de rejeitos de carvão (AMR) através do beneficiamento do rejeito bruto. A metodologia do trabalho compreendeu as seguintes etapas: (a) amostragem do rejeito de carvão no módulo de rejeitos de uma típica mineradora de carvão de Santa Catarina; (b) o beneficiamento gravimétrico do rejeito bruto visando a concentração dos minerais inertes e ajuste da granulometria; (c) a caracterização química, física, morfológica e mineralógica do AMR; (d) a produção dos blocos de concreto com cinco diferentes porcentagens de substituição (0, 25, 50, 75 e 100%) do agregado miúdo natural pelo AMR; (e) a avaliação dos blocos de concreto em relação a resistência à compressão, a resistência à abrasão e a absorção de água; e (f) realização de ensaios estáticos e cinéticos para a predição da ocorrência de lixiviado ácido a partir do rejeito de carvão, no AMR e nos blocos de concreto produzidos. Os resultados demonstram que é possível a transformação de 44% do material disposto em um módulo de rejeitos em AMR para construção civil. O material apresenta 90% de cinzas, teor de enxofre de 1,9% e teor de carbono de 3,5%. De acordo com a ferramenta estatística ANOVA, os resultados obtidos com os blocos produzidos com 25% e 50% de substituição não apresentam diferença significativa em relação aos blocos referência (0% de substituição) nas três variáveis de resposta analisadas. Os resultados dos ensaios estáticos e cinéticos demonstraram que o rejeito bruto e o AMR são potenciais geradores de drenagem ácida de minas (DAM). Os blocos produzidos não possuem a característica de gerar DAM devido à alta alcalinidade do cimento, sendo essa tecnologia conhecida como solidificação/estabilização (S/S). O estudo demonstra que é possível aproveitar parte dos rejeitos da mineração de carvão como agregado miúdo na produção de blocos de concreto para pavimentação, reduzindo o passivo ambiental das indústrias carboníferas catarinenses. Cria-se, assim, uma nova perspectiva para o gerenciamento de resíduos sólidos de mineração dentro dos princípios da produção mais limpa e desenvolvimento sustentável.

ABSTRACT

The aim of this study was the use of coal waste from the coal region of Santa Catarina in the manufacture of concrete block for paving to replace the natural fine aggregate. It was produced a recycled fine aggregate from coal waste (AMR) through the processing of raw waste. The methodology of the research comprised the following steps: (a) sampling of coal waste in the coal tailing of a typical coal mining company of Santa Catarina; (b) processing raw waste aiming to concentrate inert mineral stream and grain size adjustment; (c) chemical, physical, morphological and mineralogical characterization of the AMR; (d) production of concrete blocks with five different percentages of replacement (0, 25, 50, 75 and 100%) of natural fine aggregate by AMR; (e) evaluation of concrete blocks regarding the compressive strength, abrasion resistance and water absorption; and (f) performance of static and kinetic tests for predicting the occurrence of acid leached from the raw waste, AMR and concrete blocks produced. The results show that it is possible to transform 44% of the coal tailing in an AMR for construction. The material has 90% of ash, sulfur content of 1.9% and carbon content of 3.5%. According to the ANOVA, the results obtained with the blocks produced 25% and 50% of replacing present no significant difference for the reference blocks (0% replacement) on the three response variables examined. The results of kinetic and static tests showed that the raw waste and AMR are potential generators of acid mine drainage (AMD). The produced blocks have not the characteristic of generating AMD due to high alkalinity of cement. This technology is known as solidification/stabilization (S/S). The study shows that it is possible to make good use of the coal wastes from mining as fine aggregate in the production of concrete block for paving. It reduces the environmental liability of coal industries in Santa Catarina and creates therefore a new perspective for the management of solid waste from mining within the principles of cleaner production and sustainable development.

1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico de produtos e serviços traz progresso e comodidade. Em contrapartida, os mesmos processos que facilitam a vida também são responsáveis pela contaminação dos sistemas do ambiente (ar, solo e água). O carvão mineral constitui na principal opção para geração de energia elétrica em âmbito mundial. Entretanto, a falta de um sistema de gestão ambiental adequado para sua produção pode resultar em severos impactos ambientais.

No Brasil, apenas 1,3% da energia elétrica é produzida através do carvão mineral (MME/ANEEL apud Amaral Filho, 2009). Porém, segundo o Plano Nacional de Energia 2030 (Brasil/MME, 2007), o aumento das técnicas de “queima limpa” para carvões mais pobres, o aumento do preço de outros combustíveis fósseis (gás natural e petróleo) e a perspectiva de dificuldades no aproveitamento dos recursos para fins hidrelétricos ainda disponíveis no país aumentaram as atenções para uma possível expansão do parque termelétrico no país, principalmente dentro da perspectiva de longo prazo (Amaral Filho, 2009).

Sendo assim, deve-se buscar soluções para atenuar o impacto causado pela extração e utilização do carvão mineral nos próximos anos. Ainda, devem-se buscar alternativas para dar fim ao passivo ambiental gerado durante o período onde a degradação ambiental ainda não era encarada como um problema a ser resolvido.

Os resíduos sólidos gerados durante a produção de carvão mineral apresentam alto potencial poluidor e requerem grandes áreas para sua disposição. A grande quantidade de resíduos sólidos gerados durante a etapa de extração e beneficiamento do carvão mineral representa um grande problema para as empresas produtoras e para a população residente em áreas localizadas no entorno das minas. Atualmente, na região carbonífera do estado de Santa Catarina (SC), cerca de 65% do minério bruto, também conhecido como carvão ROM (run-of-mine), são dispostos em módulos de rejeitos após o processo gravimétrico de concentração da matéria carbonosa.

Esses rejeitos são compostos por pirita (FeS_2) e rochas sedimentares, que estão naturalmente associados ao carvão mineral. Esses minerais são separados do carvão mineral por processos gravimétricos. Os rejeitos de carvão podem gerar um efluente líquido, denominado Drenagem Ácida de Minas (DAM), decorrente da oxidação da pirita na presença

de oxigênio e água. Esse efluente é composto por ferro (nas formas Fe^{+2} e Fe^{+3}), sulfatos e outros metais presentes na matéria mineral e se constitui no principal problema ambiental em regiões carboníferas. Esse efluente, quando não tratado, é capaz de impactar negativamente o solo, os recursos hídricos (superficiais e subterrâneos) e a biota. Seu tratamento gera custos e grande quantidade de lodo, que, por sua vez, também necessita de uma gestão adequada e exige altos custos para disposição.

O conceito de desenvolvimento sustentável tem sido bastante discutido. A aplicação de seus preceitos tem com objetivo melhorar o desempenho ambiental, econômico e social na gestão de empresas de diversos setores. O tripé da sustentabilidade, como é conhecido, prevê que seja dada devida atenção tanto para as questões ambientais quanto para o reflexo econômico e social de um determinado projeto ou atividade. Diversos estudos têm sido conduzidos relacionados a sustentabilidade de empresas produtoras de carvão devido à dependência em âmbito mundial desse recurso e do seu alto potencial poluidor. Nos últimos doze anos, na indústria de produção de carvão mineral, estratégias como o estabelecimento de indicadores, estudos para melhoria da qualidade de vida dos trabalhadores residentes no entorno das minas, criação de metodologia para identificação de pontos de melhoria do sistema, recuperação de áreas degradadas, utilização de resíduos e otimização do desempenho das etapas do processo produtivo tem sido objetos de pesquisa (Smink and Heynen, 2000; Liang et al., 2009; Chikkatur et al., 2009; Si et al., 2010; Bian et al., 2010; Giurco e Cooper, 2012).

A aplicação dos preceitos da produção mais limpa (P+L) vem de encontro com os preceitos do desenvolvimento sustentável. Torna-se cada vez mais importante atacar o problema do passivo ambiental gerado pelas indústrias carboníferas, seja reduzindo o volume de rejeitos a serem dispostos nos módulos ou utilizando os rejeitos acumulados dispostos no passado. A prática da simples disposição de resíduos em aterros tem se mostrado ineficiente do ponto de vista ambiental.

Em um estudo realizado com os rejeitos de uma das carboníferas da região de Criciúma (SC), Amaral Filho (2009) propõe a separação densimétrica dos rejeitos de forma a gerar uma fração rica em matéria carbonosa, outra composta por materiais inertes e outra formada por um concentrado de pirita. A fração rica em matéria carbonosa é passível de queima em termoelétricas de leito fluidizado. A fração inerte é composta predominantemente por rochas sedimentares do tipo folhelhos e siltitos. Representa mais de 50% do volume do módulo e

possui características atrativas para aplicação na indústria da construção civil, sendo esta o alvo do presente trabalho. A fração pirítica pode ser utilizada na produção de ácido sulfúrico, sulfato férrico (Menezes, 2009; Colling, 2010) e sulfato ferroso (Vigânico, 2009).

O setor da construção civil possui alto potencial de aplicação de resíduos gerados em outros processos devido à grande diversidade e volume de insumos usados na produção. De acordo com Costa (1998), o aproveitamento de rejeitos de qualquer tipo, e em particular os rejeitos industriais, devem ser encarados como uma prática preservacionista restauradora, de elevado sentido ambiental e ecológico. Por apenas esta razão já se justificaria a busca de utilização desses produtos na construção civil, independente de outras ações simultâneas.

Dentre todas as possibilidades de emprego de resíduos na construção civil, a substituição das matérias-primas utilizadas na fabricação do concreto vem se mostrando bastante atrativa. O uso de materiais alternativos como substituto ao cimento ou aos agregados pode gerar concretos de qualidade satisfatória e contribui não apenas para a eliminação da necessidade de disposição dos resíduos em aterros industriais, mas também para redução da pressão sobre os recursos naturais. No caso de resíduos perigosos ou com capacidade de lixiviar ou solubilizar contaminantes, Poon et al. (1986) afirma que a combinação com o cimento pode imobilizar os contaminantes através de reações químicas e mecanismos físicos, conhecida comumente como processo de solidificação/estabilização.

No entanto, como o objetivo é gerar produtos comercializáveis, as características do produto devem ser consideradas de forma a se verificar se os resíduos atendem as especificações técnicas mínimas para seu emprego na produção de concretos. Procura-se evitar a produção de concretos com má qualidade ou efeitos deletérios decorrentes da presença do resíduo na mistura. Dessa forma, a caracterização física e química do resíduo é de suma importância, assim como a caracterização mecânica, ambiental, microestrutural e a durabilidade dos corpos-de-prova produzidas com o resíduo.

1.1 Objetivo Geral

Estudo da viabilidade de utilização de rejeito de carvão beneficiado, proveniente da região carbonífera de Santa Catarina, na fabricação de blocos de concreto para pavimentação em substituição ao agregado miúdo natural.

1.2 Objetivos Específicos

- a) Beneficiamento do rejeito bruto a fim de separar a sua fração rica em matéria mineral inerte e conferir-lhe faixa granulométrica que permita seu uso como agregado miúdo para produção de concreto;
- b) Caracterização química, física, morfológica e mineralógica do material obtido com vista à incorporação do material no concreto;
- c) Definição das porcentagens de substituição do agregado miúdo natural pelo Agregado Miúdo Reciclado de Rejeito de Carvão (AMR) que não comprometam a qualidade dos blocos de concreto, considerando as propriedades avaliadas;
- d) Avaliação das propriedades (resistência à compressão, resistência à abrasão e absorção de água) de blocos de concreto para pavimentação produzidos com diferentes teores de substituição do agregado miúdo natural pelo AMR;
- e) Estudo da predição de geração da Drenagem Ácida de Minas (DAM) proveniente do AMR e dos blocos de concreto produzidos através de ensaios estáticos e cinéticos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura aborda de uma forma geral a produção de carvão mineral e seus impactos ambientais, a produção de concreto e o emprego de resíduos na construção civil. O principal aspecto ambiental abordado relacionado aos impactos ambientais provenientes da produção de carvão mineral é a geração da DAM. Ainda, os métodos de controle e predição são apresentados. Nos itens referentes ao concreto, são abordadas questões relativas à qualidade dos agregados e à fabricação dos blocos de concreto para pavimentação. O próximo item abordado, o processo de solidificação e estabilização de resíduos, integra os assuntos “fabricação de concreto” e “utilização de resíduos na construção civil”, principalmente quando o cimento é utilizado para esse fim. Nele são discutidas características dos resíduos que podem determinar o sucesso da aplicação dessa tecnologia. Por fim é apresentada uma revisão da literatura sobre o emprego de resíduos na produção de concretos e sobre a utilização de resíduos da mineração de carvão na construção civil considerando todo seu espectro de possibilidades. É dada ênfase aos aspectos a serem considerados quando do emprego de rejeitos de carvão na fabricação de concreto.

2.1 Produção de carvão mineral e seus impactos ambientais

No planeta Terra são encontradas rochas de diversas origens, formadas pela solidificação de materiais provenientes do manto, por precipitação de soluções aquosas, recristalização de outros materiais e pelo acúmulo, através de milhões de anos, de resíduos de outras rochas previamente formadas. Nas rochas sedimentares, podem-se apresentar massas coerentes de matéria orgânica, na forma de carvão mineral, formada a partir de vegetais soterrados e que, sob pressão e temperaturas elevadas, na ausência de ar, sofreram transformações físico-químicas e geológicas, ao longo dos anos (Araújo, 2007).

O carvão é constituído principalmente por carbono, oxigênio e hidrogênio (Silva et al. 1990). Classifica-se geralmente em quatro tipos: a turfa (60% de carbono), o linhito (70% de carbono), a hulha ou carvão betuminoso (80 a 85% de carbono) e o antracito (90% de carbono). Nesta ordem, aumenta também seu *rank* e diminui a concentração de hidrogênio. O estágio mínimo para a utilização industrial do carvão é o do linhito. Outro índice qualitativo do carvão, segundo o Balanço Mineral Brasileiro (DNPM, 2001) é o *grade*, que mede de forma inversamente proporcional o percentual em massa de matéria mineral incombustível (cinzas) presente na camada carbonífera. Um baixo *grade* significa que o carvão possui alto

percentual de cinzas misturado à matéria carbonosa, conseqüentemente, empobrecendo sua qualidade.

A Figura 1 apresenta um diagrama mostrando o processo produtivo do carvão mineral. As principais etapas são lavra da jazida e o posterior beneficiamento do material extraído com a finalidade de concentrar a matéria carbonosa. Somente após o beneficiamento é que o carvão retirado da jazida agrega valor comercial. Porém, concomitantemente, materiais sem valor comercial também são gerados.

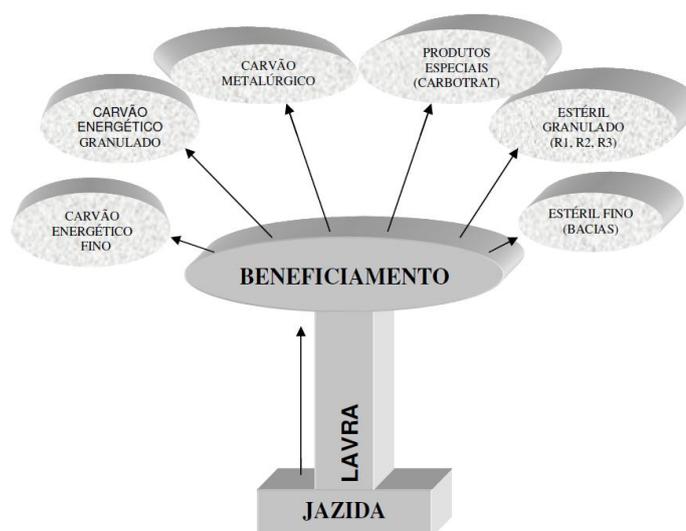


Figura 1: Diagrama dos produtos de mineração do carvão (Schneider, 2006) .

2.1.1 Beneficiamento de Carvões

Segundo Schneider (1987), devido às suas características, o carvão brasileiro requer uma etapa de beneficiamento objetivando uma redução no teor de cinzas e enxofre, para seu consumo industrial. De acordo com Sampaio (1983), beneficiamento (ou lavagem) de carvões, no seu sentido mais amplo, conceitua-se como sendo o conjunto de operações unitárias necessárias para separar, em maior ou menor grau, as impurezas (material inorgânico não combustível) da matéria carbonosa propriamente dita (material orgânico), em condições aceitáveis sob o ponto de vista técnico e econômico. Conforme a finalidade de utilização do carvão, as características do carvão lavado e o método empregado no seu beneficiamento irão variar.

Conforme Sampaio e Tavares (2005), o carvão é formado por minerais inertes (ganga) e por “minerais orgânicos” chamados macerais e estes são divididos em: vitrinita, exinita e inertinita, com densidades variáveis conforme o teor de carbono. Portanto, por não ser uma

rocha homogênea, a densidade do carvão é determinada pela concentração relativa dos diversos constituintes orgânicos e inorgânicos presentes no carvão. A matéria inorgânica presente no carvão é mais densa que os macerais. Assim, quanto maior a concentração da matéria carbonosa no material, menor será sua densidade. O teor de cinzas está diretamente ligado à quantidade de minerais inertes presentes no carvão, podendo-se afirmar que quanto mais denso for o produto menor sua qualidade para a queima.

Especificamente no extremo sul de Santa Catarina, o carvão é obtido a partir de minas a céu aberto, subterrâneas e também em instalações de beneficiamento de antigos depósitos de rejeitos que se encontram na região. Na maioria dos casos, os constituintes orgânicos não se encontram suficientemente concentrados para sua utilização direta, necessitando de algum tipo de beneficiamento que resulte acréscimo na concentração da matéria orgânica e redução dos minerais de ganga a proporções aceitáveis. Nas instalações de beneficiamento, o minério lavrado e os rejeitos são concentrados em jigues, espirais, hidrociclones e mesas concentradoras. A recuperação mássica está em torno de 40% de produto comercializável para carvão ROM e 10% de produto comercializável para rejeitos submetidos ao re-beneficiamento (Soares e Trindade, 2002).

A preparação do carvão ROM, através da cominuição ou fragmentação (britagem e moagem) e através da classificação granulométrica (ciclonagem ou peneiramento), se faz necessária. Essa etapa antecede a concentração do carvão propriamente dita. Segundo Galery et al. (2007), os principais objetivos da fragmentação são: (a) atingir o grau de liberação necessário, separando a matéria orgânica da matéria mineral (ganga); e (b) atingir as especificações granulométricas exigidas pelo mercado.

A avaliação do grau de liberação pode ser realizada por diversos métodos divididos em dois tipos: os diretos e os indiretos. Nos métodos diretos há a observação direta das amostras. O método de Gaudin, que utiliza a microscopia ótica, é bastante conhecido e consiste na observação das amostras minerais em várias faixas granulométricas, obtendo-se o grau de liberação para cada uma delas. Nos métodos indiretos, a avaliação é feita aplicando um método de concentração adequado à separação da espécie útil. O grau de liberação é avaliado através da análise de resultados de concentração obtidos para cada faixa ou por curvas de separabilidade. Esta concentração é realizada considerando-se uma propriedade diferenciadora como densidade, susceptibilidade magnética, condutividade ou propriedades

superficiais. No caso específico da densidade, os líquidos orgânicos são muito utilizados em testes de afunda/flutua (Brandão et al., 2007).

De acordo com Rubio (1988), Cebeci e Aslan (2002), Sampaio e Tavares (2005), os testes de afunda-flutua são amplamente utilizados para o beneficiamento de carvão, pois através destes pode ser estimada a sua acessibilidade através da concentração gravimétrica. Estes testes são realizados em faixas densimétricas pré-fixadas. Com seus dados, são feitas as curvas de lavabilidade, também conhecidas como curvas de Henry-Reinhardt (curva densimétrica, curva dos flutuados e dos afundados, curva elementar e curva de tolerância densimétrica ou *Near Gravity Material* ou simplesmente NGM). Tais curvas, conforme Figura 2, são utilizadas para avaliar o grau de dificuldade da separação gravimétrica do carvão bruto e, promover dados qualitativos ou quantitativos para os produtos de separação na densidade relativa selecionada. Obtém-se, assim, a recuperação mássica e os teores dos produtos em qualquer densidade particular.

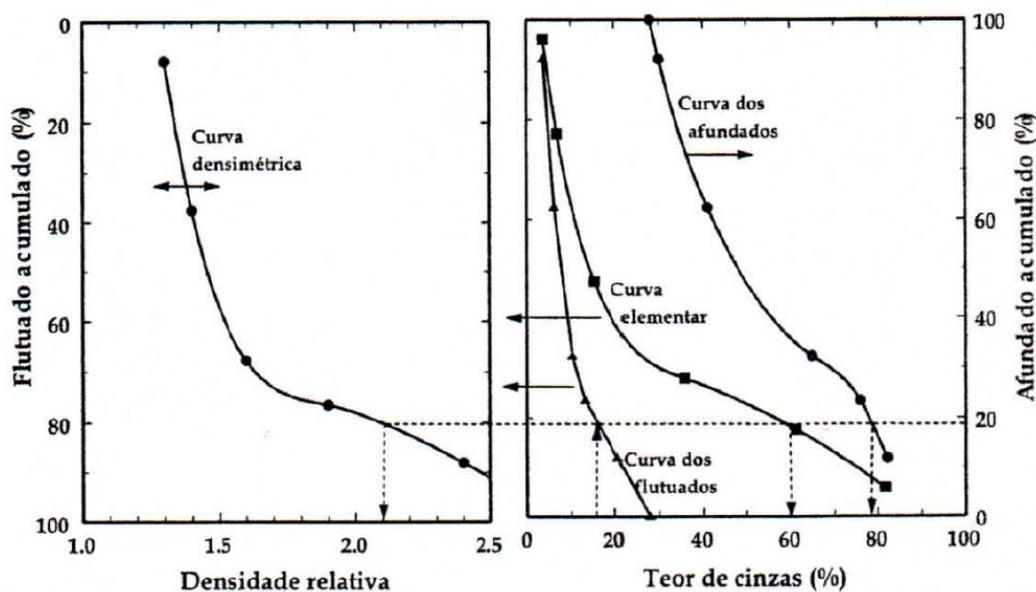


Figura 2: Curvas de separabilidade de um carvão (Tavares e Sampaio, 2005).

A Figura 3 apresenta os efeitos do tamanho das partículas de carvão na precisão do beneficiamento. Quanto maior a granulometria maior é a eficiência do equipamento, entretanto menor é seu grau de liberação. Tavares e Sampaio (2005) consideram que os equipamentos existentes para separação de grossos de carvão são restritos aos jigues e à separação por meio-denso. Conforme Leonard et al. (1979), para a concentração dos finos de carvão, o número de opções aumenta bastante, incluindo ciclones e cilindros a meio-denso (custo mais elevado), mesas concentradoras, espirais, calhas, jigues (custo mais baixo).

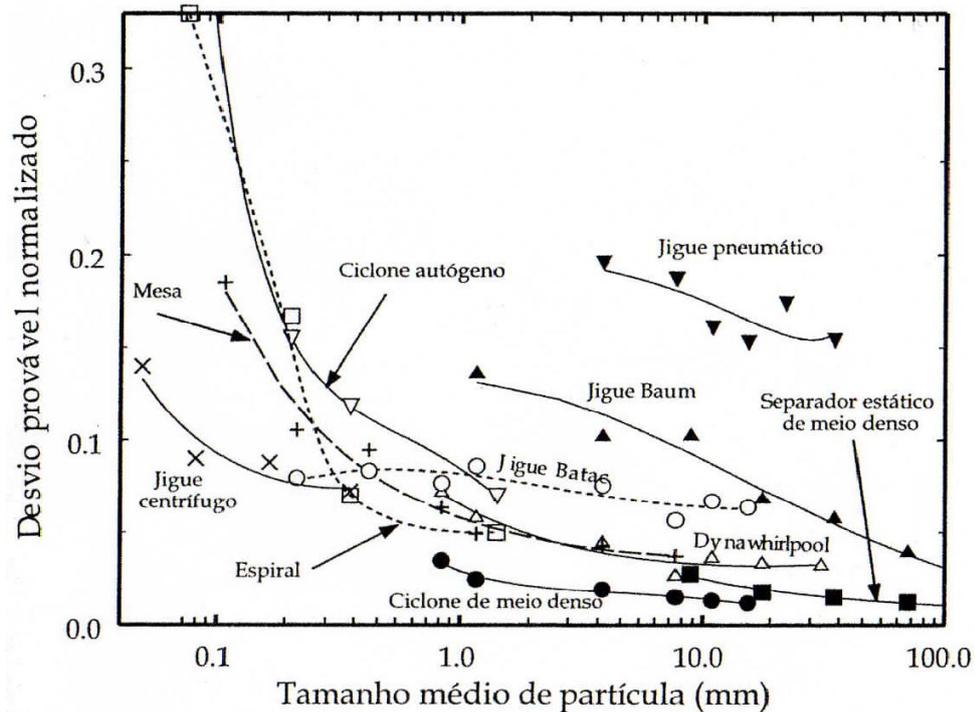


Figura 3: Efeito do tamanho de partícula na precisão de separação no beneficiamento de carvão (Tavares e Sampaio, 2005).

De acordo com Sampaio (1983), podem-se dividir os processos de beneficiamento de carvões em dois grandes grupos: (a) processos baseados em diferenças de densidade, como exemplo temos jigagem, ciclonação, vasos de meio denso, etc; (b) processos baseados em fenômenos superficiais, como exemplo temos flotação, aglomeração oleosa, etc.

2.1.2 Impactos Ambientais da Mineração de Carvão

Atividades de mineração normalmente proporcionam à comunidade localizada em sua área de influencia um aumento na oferta de emprego e renda, na disponibilidade de bens e serviços e na arrecadação de impostos, mas em contrapartida também podem levar à alterações indesejáveis na paisagem e nas condições ambientais do entorno (Borma e Soares, 2002).

McAllister e Milioli (2000) citam seis principais estágios da atividade de mineração: pesquisa, desenvolvimento, extração, concentração do minério, processamento/refinamento e desativação após o fechamento da mina. Todas estas etapas proporcionam impactos ambientais, desde distúrbios no solo, contaminação da água e poluição do ar.

No caso da mineração do carvão brasileiro, tipicamente, 40 a 70% do carvão *run-of-mine* (ROM) são descartados como rejeito. Esse material é composto por matéria carbonosa

misturada com pirita, argilas, arenitos e folhelhos (Vigânico, 2009). Borma e Soares (2002) classificam os resíduos gerados em dois tipos: (a) estéreis, e (b) rejeitos. Os estéreis são os materiais de cobertura, as camadas intermediárias ou circundantes do mineral de interesse, extraídos fisicamente através do uso de explosivos ou escavadeiras. Enquanto que rejeitos são resíduos sólidos resultantes das operações de beneficiamento e metalurgia extrativa. Em ambos os casos, se dispostos inadequadamente, tornam-se graves problemas ambientais devido aos danos que podem causar aos recursos hídricos, ao solo e ao ar. A Figura 4 apresenta uma área impactada pela disposição inadequada de rejeitos enquanto que na Figura 5 observa-se a geração da DAM.



Figura 4: Rejeitos de carvão dispostos na região carbonífera de Santa Catarina (cortesia de Edson Maciel, 2008).



Figura 5: Geração da DAM.

Na região carbonífera de Santa Catarina, o carvão mineral começou a ser produzido no início do século passado. Com o passar dos anos a produção na região foi aumentando, assim como o número de empresas. Conseqüentemente, a geração de rejeitos de carvão apresentou grande aumento. A Figura 6 apresenta a evolução da geração de rejeitos de carvão.

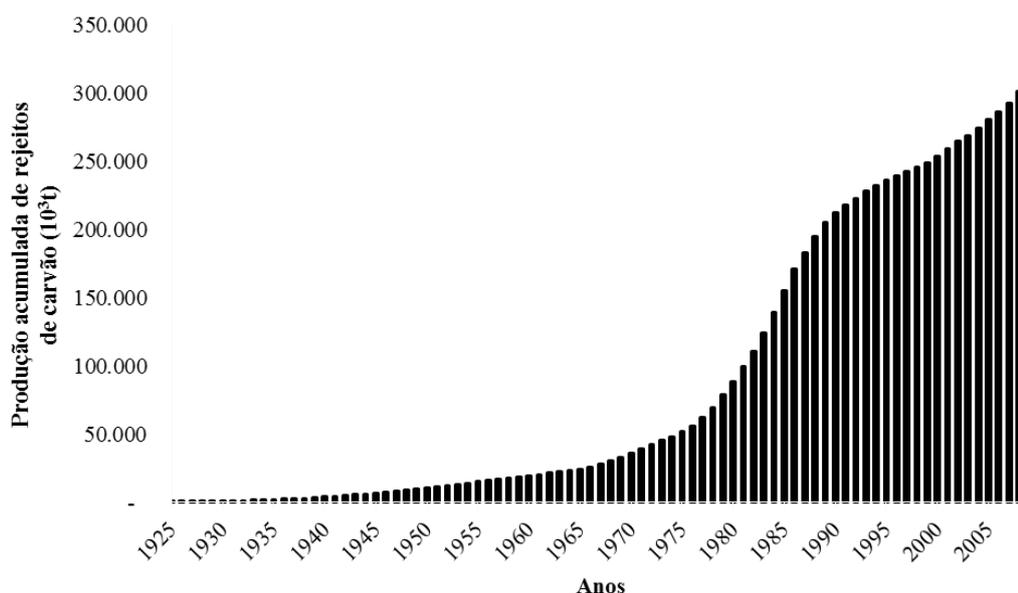


Figura 6: Produção de rejeitos de carvão na região carbonífera de Santa Catarina.

De acordo com Kontopoulos (1989), a pirita (FeS_2), quando exposta ao oxigênio e à umidade, é extremamente suscetível à oxidação, acarretando a formação de águas ácidas, com elevadas concentrações de sulfato, ferro e outros metais dissolvidos, denominada drenagem ácida de minas (DAM). A geração da DAM representa o principal impacto ambiental decorrente da produção de carvão mineral.

De acordo com o mesmo autor, uma vez gerada na fonte, a DAM tende a se estender por todo o ecossistema próximo, provocando um grande número de reações e fenômenos físico-químicos em série. Além da precipitação de hidróxidos metálicos que se depositam ao longo do caminho do fluxo das águas percoladas e daqueles que permanecem suspensos em solução, outros fenômenos estão envolvidos na migração da drenagem ácida a partir da fonte:

- Adsorção de íons de metais tóxicos em superfícies de partículas minerais como argilas no sol, hidróxidos férricos e jarositas produzidos *in-situ* por neutralização da DAM;
- Reações de troca iônica;

- Complexação metálica por substâncias húmicas do solo;
- Precipitação como sulfetos insolúveis quando íons livres em solução entram em contato com íons S^{2-} .

Os efeitos da DAM sobre ecossistemas de rios e córregos ficam evidenciados pelo aumento da acidez que reflete a oxidação dos íons férricos e a diminuição do oxigênio dissolvido, com concomitante liberação de metais tóxicos ao ambiente (Sendlein et al., 1983).

De acordo com Gavronski (2007), o descarte sem técnica ou cuidados adequados em áreas próximas ao lavador, ao longo de rodovias, banhados e margens de rios gerou um elevado passivo ambiental e social. Áreas cobertas com material acidificado com enxofre e metais tóxicos, sujeitos a autocombustão, com geração de gases tóxicos são fatores decorrentes da má gestão dos resíduos. Além disso, os aquíferos superficiais são contaminados por estes materiais por ocasião de chuvas e inundações.

Os principais impactos ambientais relacionados à extração do carvão são: drenagem ácida das minas (DAM), que polui tanto águas superficiais como subterrâneas; degradação do solo devido ao acúmulo dos resíduos da mineração; contaminação de áreas urbanas e rurais; poluição do ar; perda de solos e de reservas de água em razão do acúmulo dos resíduos do carvão; e impacto visual (Barreto, 2001).

Em minas de carvão, o metano é a fonte de poluição gasosa de maior importância e pode provocar explosões e incêndios com a consequente produção de gases tóxicos. Os incêndios causados pelo gás metano provocaram grandes catástrofes em muitas minas de carvão no mundo (Torres et al., 2005).

O estado de Santa Catarina é o local onde foram maiores os impactos devido à geração termoelétrica e à mineração do carvão. Este Estado já foi o maior produtor de carvão no país. No processo de lavra a céu aberto, a remoção do capeamento foi realizada de forma desordenada, provocando a inversão das camadas, dando origem à chamada paisagem lunar (Milioli, 1999 apud Gavronski, 2007). Na maioria das pilhas, a camada fértil do solo foi deixada na base e, na crista, arenito, siltitos, folhelhos carbonosos e piritosos, fatos que tornam o processo de reabilitação muito oneroso (Gavronski, 2007). Atualmente existem aproximadamente 4.000 ha de áreas degradadas pelos rejeitos da mineração de carvão, segundo dados da Secretaria de Estado de Desenvolvimento e Meio Ambiente – SDM, o que

levou a região Sul do estado a ser classificada como a 14ª Área Crítica Nacional pelo Decreto Federal 85.206/80 (Barreto, 2001).

O Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas e a Universidade do Extremo Sul Catarinense (IPAT-UNESC, 2000 apud Gavronski, 2007) verificaram que 20% a 65% das amostras obtidas de águas subterrâneas estão contaminadas.

2.1.3 A Drenagem Ácida de Minas

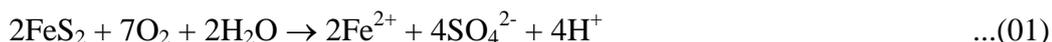
A drenagem ácida de minas (DAM) é o resultado de uma série complexa de reações químicas, envolvendo: (a) geração de ácido sulfúrico devido à oxidação de sulfetos pela ação combinada de oxigênio e água (estas reações são autocatalíticas e sua taxa pode ser acelerada pela atividade bacteriana); (b) consumo da acidez por minerais alcalinos; e (c) precipitação de hidróxidos metálicos, gesso ou outros compostos complexos (Kontopoulos, 1998).

A DAM gerada quase sempre apresenta uma coloração marrom-amarelada atribuída ao íon férrico (Fe^{+3}). Ainda, contêm em suspensão produtos das reações de precipitação que conferem coloração, como avermelhado (hidróxido de ferro) ou brancos (hidróxido de alumínio) (Skousen et al, 1998).

2.1.4 Reações de oxidação e geração de acidez

De acordo com Kontopoulos (1998), a drenagem ácida resulta de uma série complexa de reações químicas envolvendo mecanismos diretos, indiretos e ação microbiana. Algumas reações de oxidação resultam na geração de ácido, enquanto outras resultam na dissolução e mobilização de metais pesados.

A pirita (FeS_2) é o principal mineral responsável pela geração de acidez. É estável e insolúvel, desde que não entre em contato com o ar e a água. Porém, como resultado da mineração, ela é colocada em exposição com ar e água, ocorrendo as seguintes reações:



A reação 01 produz acidez, e se o potencial de oxidação for mantido, a oxidação do íon Fe^{2+} para Fe^{3+} ocorrerá, consumindo parte da acidez da pirita gerada pelos íons H^+ :



Esta reação ocorre abioticamente em valores de pH mais elevados (acima de 4,5) e diminui à medida que o pH decresce. Em valores de pH menores que 3,5, a oxidação do íon ferroso (Fe^{+2}) para íon férrico (Fe^{+3}) somente em presença de oxigênio passa a ser muito baixa. Entretanto, essa reação pode ser acelerada pela ação de bactérias quimiolitotróficas acidófilas do gênero *Thiobacillus*. Essas bactérias catalisam a reação 02, que pode ser acelerada em até 10^6 vezes.

Se o pH da solução for maior do que 3, o Fe^{+3} irá hidrolisar precipitando na forma de hidróxido e gerando acidez, conforme equação 03:



Ainda, o Fe^{3+} , gerado na reação 02, poderá oxidar a pirita (FeS_2) pela reação indireta:



O Fe^{+2} resultante da reação (04) será oxidado para Fe^{+3} pela reação 02 e estará novamente disponível para oxidar a pirita, entrando o fenômeno em um ciclo crescente conhecido como autocatálise. O ciclo permanece até que toda pirita acessível aos agentes de reação tenha sido consumida. O baixo pH da água aumenta a solubilização de metais. No caso da mineração de carvão, além do ferro, a drenagem ácida de minas apresenta valores significativos de Al, Mn e Zn. Pode também apresentar traços de Cu, Ni, Cr, Pb e outros metais.

2.1.5 Controle da drenagem ácida de mina

O controle da drenagem ácida é um fator importante para prevenir a liberação de acidez e metais na forma dissolvida para o meio ambiente a partir de áreas de mineração em operação, abandonadas ou pelos depósitos de rejeitos ativados ou desativados. Pastore e Miotto (2000) citam que as medidas de controle da drenagem ácida, sejam elas preventivas ou atenuadoras, exigem uma avaliação completa sobre a situação atual da mina, o conhecimento dos principais impactos ambientais causados pela atividade mineira e o domínio de técnicas adequadas para sua implementação.

Os métodos de controle de DAM estão sendo aprimorados. De acordo com Kontopoulos (1998), os métodos se classificam em três categorias: métodos preventivos, de controle da migração e de remediação. Na Tabela 1 é apresentado um resumo geral dos

métodos aplicados. Pode-se dizer que somente alguns destes métodos estão sendo atualmente aplicados no controle da DAM na mineração de carvão do Brasil.

Tabela 1: Métodos de controle da drenagem ácida de minas (adaptado Kontopoulos, 1998)

Métodos preventivos	remoção/isolamento dos sulfetos;
	exclusão de oxigênio por cobertura de água;
	exclusão de oxigênio por cobertura seca;
	aditivos alcalinos;
	bactericidas.
Métodos de contenção	prevenção do fluxo de água;
	paredes reativas porosas;
	disposição em estruturas de contenção.
Métodos de remediação	<i>Sistemas ativos:</i>
	neutralização e precipitação (hidróxidos ou sulfetos);
	adsorção/troca iônica;
	osmose reversa;
	eletro-diálise.
	<i>Sistemas passivos:</i>
	filtro aeróbio de calcário;
	dreno anóxico de calcário;
	barreira permeável reativa;
	wetlands;
	reator de fluxo vertical.

Nos métodos preventivos, o objetivo é cessar ou reduzir drasticamente a taxa de acidificação. Isso pode ser feito reduzindo o contato dos sulfetos com a água e/ou oxigênio, eliminando as bactérias responsáveis pela catalisação das reações ou controlando outros fatores que influenciam as reações (Kontopoulos, 1998). Os métodos de contenção têm a função de evitar ou ao menos reduzir a emissão de DAM para o meio ambiente. Sabe-se que muitas vezes esta emissão não pode ser evitada, mas pode ser minimizada (Kontopoulos, 1998). Os métodos de remediação consistem em coletar e tratar a DAM. Podem ser ativos ou passivos. Os métodos ativos são aqueles que requerem uma dosagem contínua de reagentes químicos e/ou um alto controle operacional de equipamentos, demandando em uma infraestrutura para manter as operações necessárias. Os sistemas de tratamento passivo de DAM são aqueles que dispensam a contínua adição de reagentes, apresentando condições de operações mais fáceis (Skousen et al., 1998; Kontopoulos, 1998).

Nos métodos ativos de remediação, o tratamento mais utilizado baseia-se na neutralização da DAM, remoção da acidez e precipitação dos metais na forma de hidróxidos. Quando a qualidade final do efluente não for satisfatória, poderão ser utilizados métodos

complementares tais como adsorção ou troca iônica (Rubio et al., 2002). Os métodos passivos envolvem a descontaminação da DAM em drenos aeróbicos de calcáreo, dreno anóxicos de calcáreo, barreiras permeáveis reativas e banhados construídos (Wetlands) (Kontopoulos, 1998). O emprego de banhados construídos vem sendo crescentemente utilizada nos últimos anos como uma alternativa técnica com relação aos processos convencionais, embora sejam eficientes somente no tratamento de efluentes com cargas reduzidas de contaminantes (Tyrrel et al., 1997).

Este trabalho envolve concomitantemente vários métodos preventivos de controle da DAM realizadas em duas etapas. Inicialmente, no processo de separação densimétrica, será realizada a remoção/isolamento de sulfetos. Na preparação dos blocos é adicionado cimento, caracterizando os métodos de aditivos alcalinos e exclusão do oxigênio. Cabe ressaltar, no entanto, que a atual proposta visa também o emprego do material para fabricação de um produto comercializável, agregando valor ao material.

Detalhes dos outros métodos de controle da DAM podem ser vistos em Skousen et al. (1998).

2.2 Previsão da geração da drenagem ácida de mina

Diversos métodos são usados para avaliar e prever o potencial de formação da drenagem ácida. Apesar das várias pesquisas realizadas na busca de um método único para fornecimento de toda a informação na avaliação de geração de ácido, o consenso existente ainda hoje é de que a combinação de dois ou mais métodos proporciona uma avaliação mais exata. Sua realização visa, segundo Skousen et. al. apud Farfan et al, 2004, a obtenção de dois importantes resultados: (1) o potencial de geração de ácido e o potencial de neutralização dos diversos minerais que serão expostos durante o processo de exploração e exploração mineral; (2) o potencial de liberação de elementos tóxicos (metais) dos minerais que estarão expostos e podem atingir ao meio ambiente. Conforme Soares e Borma (2002), estas metodologias compreendem a realização de ensaios de caracterização física, química e mineralógica do maciço rochoso.

De acordo com Guevara (2007), os diversos métodos de predição de DAM podem ser classificados em:

- Métodos estáticos, para determinar as propriedades geoquímicas (potencial para gerar acidez e potencial de neutralização) do material;
- Métodos cinéticos, para determinar o comportamento geoquímico do material no tempo e a determinação dos componentes solúveis.

A diferença básica entre os métodos reside no fato de que os ensaios estáticos não consideram a cinética das reações envolvidas no processo de oxidação e/ou neutralização dos sulfetos. Por esse motivo, tais ensaios são utilizados apenas como indicativos de potenciais problemas. A confirmação da geração de acidez, o tempo envolvido no processo e o potencial de liberação de outros contaminantes, tais como os metais pesados e os sulfatos, é obtida de maneira mais precisa nos ensaios cinéticos (Soares et al., 2008).

2.2.1 Ensaios estáticos

Os ensaios estáticos são procedimentos que visam à caracterização do potencial de geração ácida de determinada amostra, sendo comumente realizados através de avaliações do equilíbrio entre a capacidade-potencial de geração de soluções ácidas e a capacidade-potencial de neutralização do material analisado (Sobek et al., 1978). De acordo com Lima (2009), esses testes são de fácil execução e custo relativamente baixo, devendo ser realizados em uma primeira etapa do programa de determinação do potencial de geração de DAM.

Entre as principais metodologias existentes para a execução dos ensaios estáticos, destacam-se:

Teste inicial do *British Columbia Research (B.C. Research Initial Test)*

O propósito dessa metodologia é determinar o balanço entre os componentes produtores e consumidores de acidez, através da comparação entre os potenciais de acidificação e neutralização, ou seja, a capacidade de geração e consumo de ácido formado a partir da oxidação dos sulfetos. Se o consumo de ácido excede a produção de acidez, a amostra não é considerada fonte de geração de DAM e nenhum teste adicional é necessário. Por outro lado, se o consumo é menor que a produção, existe a possibilidade de geração ácida e o teste de confirmação deve ser realizado (Duncan & Bruynesteyn, 1979 apud Lima, 2009).

Teste de geração líquida de ácido (*Net Acid Generation - NAG test*)

Esse procedimento tem como objetivo determinar o potencial de geração de acidez de determinada amostra, utilizando-se peróxido de hidrogênio - H_2O_2 a 15% para a oxidação dos sulfetos, onde quantidade de ácido gerada é determinada através da titulação com hidróxido de sódio - NaOH. (Miller et al., 1997 apud Lima, 2009).

Teste padrão e Teste modificado de contagem ácido-base (*ABA Standard – Standard Acid Base Accounting e ABA Modified - Modified Acid Base accounting*)

O objetivo do teste ABA padrão é similar ao Teste inicial do *British Columbia Research*, incluindo uma avaliação acerca do equilíbrio entre a capacidade que a amostra possui de consumir ácido, denominada potencial de neutralização (NP - *Neutralization Potential*) e de gerar acidez, conhecida como potencial de geração ácida (AP - *Acid Generation Potential*). Contudo, nesse caso, a diferença entre os valores de NP e AP, definida como potencial líquido de neutralização (NNP - *Net Neutralization Potential*), é que permite classificar a amostra como potencialmente produtora ou consumidora de ácido (White et al., 1999).

Nesses procedimentos (Testes ABA), a determinação do NP, contabilizado como massa equivalente de $CaCO_3$, consiste em adicionar solução de HCl a uma determinada quantidade de amostra, o qual reage com as substâncias ou minerais de natureza neutralizadora (principalmente carbonatos) eventualmente presentes. No final da reação, o excesso de HCl, função da quantidade de minerais carbonáticos da amostra, é quantificado por titulação com hidróxido de sódio. Quanto maior a quantidade de NaOH utilizado nessa titulação, maior é o excesso de HCl e menor a quantidade de carbonatos na amostra (Sobek et al., 1978).

Dessa forma, o potencial de neutralização é dado pela diferença entre a quantidade de NaOH necessário para a neutralização do HCl adicionado e a quantidade realmente consumida. O valor do AP é estimado através da determinação do percentual de S na amostra, tendo como base a relação estequiométrica $CaCO_3/S$, que representa a quantidade de carbonato de cálcio necessária para neutralizar todo o ácido produzido pela oxidação da pirita. A determinação desses dois fatores permite calcular o potencial de neutralização líquido (NNP) e a razão do potencial de neutralização (NPR) (Sobek et al., 1978). De acordo com Borma e Soares (2002), para efeito de cálculo do AP no teste ABA padrão, considera-se que

todo o enxofre presente no material encontra-se na forma de pirita, sendo esta a única substância geradora de acidez.

Esses índices são obtidos a partir das seguintes equações:

$$NP = \frac{50 * a [x - (b/a)y]}{c}$$

Onde:

NP = potencial de neutralização

a = normalidade do HCl

b = normalidade do NaOH

c = peso da amostra (g)

x = volume de HCl adicionado (mL)

y = volume de NaOH adicionado (mL)

$$AP = \%S * 31,25$$

$$NNP = NP - AP$$

$$NPR = \frac{NP}{AP}$$

Assim, os parâmetros avaliados no método ABA são:

- Potencial de acidificação (AP): verifica se o material apresenta potencial de geração de acidez;
- Potencial de neutralização (NP): verifica se o material apresenta potencial de neutralização;
- Potencial de neutralização líquido (NNP): pode ser positivo ou negativo, sendo que valores de NNP menores do que -20 (kg CaCO₃/t) indicam a formação de ácido; valores maiores do que +20 (kg CaCO₃/t) indicam que não haverá

formação de ácido; e valores entre -20 e +20 (kg CaCO₃/t) apontam que é difícil prever o seu comportamento, sendo necessários outros ensaios para a confirmação.

- Razão do potencial de neutralização (NPR): A partir dos resultados da razão do potencial de neutralização pode-se determinar a geração ou não da DAM. O critério utilizado para classificar o material em potencialmente gerador ou não de ácido pode variar de acordo com o órgão classificador. A Tabela 2 apresenta os critérios de classificação e a Tabela 3 apresenta alguns critérios utilizados pelos órgãos licenciadores de atividades de mineração nos EUA e no Canadá.

Tabela 2: Critérios do método ABA para identificação do potencial de geração de acidez dos materiais – NPR (Kontopoulos apud Machado, 2007).

Potencial de geração de DAM	NPR	Comentário
Provável	1:1	Provável geração de DAM.
Possível	1:1 a 2:1	Poderá ocorrer a DAM se o NP for insuficiente reativo e/ou for consumido em uma taxa mais rápida do que os sulfetos.
Baixo	2:1 a 4:1	Não é potencialmente esperada a geração de DAM, a não ser que ocorra a exposição preferencial dos sulfetos ao longo de planos de fraturas ou que os sulfetos sejam extremamente reativos e os minerais neutralizantes sejam muito pouco reativos.
Nenhum	4:1	Nenhum teste adicional para a DAM é requerido, a não ser que seja como fonte de alcalinidade.

Tabela 3: Critérios do método ABA para identificação do potencial de geração de acidez dos materiais – NPR (Soares e Borma, 2002).

Local	PN:PA
British Columbia (Canada)	3
California (EUA)	3
Montana (EUA)	3
Idaho (EUA)	2
Nevada (EUA)	1,2

A Tabela 4 apresenta as principais características dos parâmetros considerados para a realização dos referidos métodos, cujas variações produzem resultados distintos para os índices NP e AP.

Tabela 4: Características dos testes ABA padrão e modificado (White et al., 1999).

Método ABA	Tamanho das partículas (mm)	AP (%S)	NP
ABA padrão	< 0,250	S total	Adiciona HCl conforme teste fizz, aquece e titula com NaOH até pH 7.
ABA modificado	< 0,250	S sulfeto	Adiciona HCl conforme teste fizz, deixa reagir 24 h a temperatura ambiente, aquece e titula com NaOH até pH 8,3.

A Tabela 5 apresenta algumas informações sobre os principais métodos estáticos: método ABA tradicional, ABA modificado, teste inicial (*British Columbia Research*) e teste de geração líquida de ácido.

Tabela 5: Informações sobre os principais métodos estáticos (Lapakko 1990).

Balanco Ácido Base (ABA) (Sobek et al, 1978)	Balanco Ácido Base (ABA Modificado) (Coastech, 1989)	Teste inicial do <i>British Columbia Research</i> (Duncan e Bruynestyan, 1979)	Teste de Geração Líquida de Ácido (Coastech, 1989)
DETERMINAÇÃO DA PRODUÇÃO DE ÁCIDO			
Potencial de Determinação de Ácido = 31.25 * S Total	Potencial de Determinação de Ácido = 31.25 * S Total (Sulfeto).	Produção Total de Ácido = 31.25 * S Total.	100 mL de H ₂ O ₂ (15%) adicionados a 5 g de rocha para oxidar diretamente os sulfetos presentes.
DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE NEUTRALIZAÇÃO			
Amostra a -60 mesh (0,24 mm); Adicional HCl, ferver 1 min e arrefecer; Ponto final da titulação pH 7,0.	Amostra a -60 mesh (0,24 mm); Adicionar HCl, agitar 23 h, temp. ambiente; Exigido um pH 1,4 - 2,0 depois de 6 h de agitação; Ponto final da titulação pH 8,3.	Amostra a -400 mesh (0,038 mm); Titular a amostra a pH 3,4 com H ₂ SO ₄ 1N; Ponto final da titulação não aplicável.	Calibre não discriminado; O ácido produzido pela oxidação da pirita dissolve os minerais tampão; Ponto final da titulação pH 7,0.
VANTAGENS			
Simples e tempo curto; Equipamento vulgar; Fácil interpretação; Pode-se testar muitas amostras.	Simples; Tempo Curto; Equipamento vulgar; Fácil interpretação.	Simples e tempo muito curto; Equipamento vulgar; Fácil interpretação; Pode-se testar muitas amostras.	Simples; Tempo curto; Equipamento vulgar; Fácil interpretação.
DESVANTAGENS			
Não se relaciona com a cinética; Admite geração e consumo de ácido em paralelo; Se o AP e o NP são próximos é difícil interpretar.	Não se relaciona com a cinética; Admite geração e consumo de ácido em paralelo; Se o AP e o NP são próximos é difícil interpretar.	Admite geração e consumo de ácido em paralelo; Diferenças de calibre não são refletidas; Se o AP e o NP são próximos é difícil interpretar.	Reprodutibilidade limitada; Incerteza: a oxidação dos sulfetos pode não reproduzir a real.

2.2.2 Ensaios cinéticos

Conforme Soares et al. (2008), o objetivo dos métodos cinéticos é prever o potencial de drenagem ácida a longo prazo dos materiais de mineração (rejeitos e estéreis), simulando condições ambientais em função do tempo. Usualmente, os métodos cinéticos são o passo seguinte após a determinação do potencial de geração de acidez a partir dos ensaios estáticos. Os objetivos dos ensaios cinéticos são os seguintes:

- Confirmação do potencial de geração de DAM;
- Avaliação das taxas de oxidação de enxofre e de geração do ácido;
- Determinação da relação, se existir, entre o início da DAM e o esgotamento do potencial da neutralização;
- Determinação do efeito das bactérias;
- Avaliação do grau de metais lixiviáveis e indicativo das concentrações de cátions/ânions que se pode esperar nas drenagens ácidas;
- Seleção do teste para avaliar e gerenciar os resíduos, áreas de disposição e respectivas estratégias de controle.

Geralmente, o método cinético se inicia após a realização do método estático em um programa de previsão ou de avaliação da jazida. O método estático proporciona informações sobre as características da rocha e do potencial de geração de acidez de maneira independente do tempo; porém os métodos cinéticos conseguem oferecer uma alternativa para examinar as velocidades de reação, tanto para a dissolução de metais como para a geração de acidez, para certas condições específicas (Guevara, 2007).

De acordo com *MEND Program* (1991), os principais parâmetros que indicam a variação de geração de acidez em função do tempo são:

- redução do pH: pH acima de 5-5,5, indica que a amostra não está gerando acidez significativamente e/ou o sistema é dominado pela alcalinidade de material calcário; pH de 3 a 5 indica que a amostra é geradora de acidez e condições ácidas e tóxicas existem; pH abaixo de 3,5 indica que o papel da bactéria *T. ferrooxidans* pode ser significativo e condições fortemente ácidas existem.

- aumento do Eh: em estágios iniciais, valores de Eh podem ser relativamente baixos (< 400 mV); valores maiores de Eh (> 450 mV) indicam um ambiente de oxidação mais forte e influência das bactérias que oxidam o ferro; Acima de 500 mV a oxidação do ferro férrico dos sulfetos pode se tornar significativa.

- Condutividade: Quantifica a facilidade com a que um elemento conduz uma corrente elétrica e reflete a presença de íons em solução (metais dissolvidos e outras espécies presentes). Valores altos de condutividade indicam que a DAM está ocorrendo.

- Sulfato: É um produto da oxidação completa do sulfeto e pode ser um indicativo da velocidade da oxidação dos sulfetos e da geração de ácido. Elevados valores de sulfato presentes na solução indicam uma forte geração de ácido mesmo tendo um pH neutro devido a alcalinidade dos carbonatos.

- Acidez: É uma medida acumulativa de diversas espécies aquosas como o Fe(OH)^{2+} , Al^{3+} . Assim a acidez pode ser utilizada como um parâmetro indicador para quantificar indiretamente o estado do processo de geração de ácido.

Os ensaios em células úmidas são realizados em recipientes com orifícios para entrada e para saída de ar. No teste da célula úmida (versão de Sobek) se lixivia uma amostra fragmentada. A norma D 5744 (ASTM, 1996) recomenda que o teste seja conduzido durante 20 semanas com ciclo de uma semana, composto por três dias de ar seco, três dias de ar úmido seguido de lixiviação com 500 ou 1000 mL de água destilada no sétimo dia. O ar seco e o ar úmido são bombeados através de 500 a 1000 gramas de amostra com granulometria inferior a 6,30. A solução deve ser analisada para determinação do pH, potencial redox, acidez, alcalinidade, condutividade, concentração de metais e concentração de cátions e ânions.

O teste de extração Soxhlet simula a erosão geoquímica utilizando um aparelho de extração soxhlet para recircular as soluções através da amostra. A amostra é colocada num cilindro dentro da unidade e a solução é circulada a partir de um reservatório. Utilizam-se duas versões – uma é o teste padrão descrito por Singleton e Lavkulich (1978); a outra é o teste modificado por Sobek et al. (1978). No ensaio padrão a amostra é lixiviada utilizando ou uma solução de ácido acético a 70 °C ou água destilada durante um período de cerca de 6 semanas (a duração pode ser variável). O teste modificado apenas utiliza água destilada a 75 °C.

Os testes de coluna são conduzidos colocando o material em colunas (cilindros) ou em dispositivos idênticos. Criam-se ciclos de molhagem e secagem adicionando água e permitindo a sua evaporação. Cada um dos ciclos pode ocorrer durante um período de alguns dias até uma semana ou mais, apesar de tipicamente a duração ser de 3 dias. A água adicionada à coluna é recolhida e analisada para determinar a cinética da oxidação, a produção de sulfatos, a liberação de metais e outros parâmetros (*MEND Program*, 1991).

Inicialmente desenvolvido por Duncan e Bruynesteyn (1979), os testes de confirmação da *British Columbia* tinha por objetivo confirmar os resultados do Teste estático BC. Especificamente pretende-se verificar se as bactérias, previamente inoculadas, podem catalisar reações suficientes para satisfazer as suas necessidades ácidas. Uma desvantagem é que o teste ignora o potencial de neutralização e a cinética de oxidação dos sulfetos (*MEND Program*, 1991).

No teste em reator descontínuo agitado uma amostra do resíduo, ou do minério, é posta em suspensão com água e agitada. A solução é normalmente de água destilada devendo, no entanto, adicionar-se nutrientes. São determinados parâmetros de qualidade da água tais como o pH, sulfatos e íons em solução. Os resultados são utilizados para estimar a cinética da oxidação dos sulfuretos minerais e a libertação de contaminantes, especialmente os íons metálicos (*MEND Program*, 1991).

Os testes no campo utilizam grandes volumes de material para construir células de teste nas condições ambientais reais, ou seja, na área onde existem os resíduos. Os testes diferem muito dos laboratoriais pelo fato de não ocorrerem em condições controladas. O tamanho da amostra pode ser de mais de 1000 toneladas, dependendo do espaço disponível. A amostra não é normalmente fragmentada para se ter uma melhor aproximação às condições reais. A amostra é colocada por cima de um fundo impermeabilizado que permita a recolha das soluções existindo canais coletores para recolha dos lixiviados. Mede-se o volume de solução e determina-se o pH, os sulfatos, metais dissolvidos e outros parâmetros (*MEND Program*, 1991). A Tabela 6 apresenta uma síntese dos cinéticos apresentados.

Tabela 6: Informações gerais sobre os principais tipos de ensaios cinéticos (Lapakko, 1990).

	CÉLULAS ÚMIDAS (Sobek et al., 1978)	EXTRACÇÃO SOXHELET (Singleton and Lavkulich, 1978; Sullivan and Sobek, 1982)	TESTES EM COLUNAS (Bruynsteyn and Hackl, 1982; Hood and Oertel, 1984)	CONFIRMAÇÃO INVESTIGAÇÃO BC (Duncan and Walden, 1975)	REATOR DESCONTÍNUO (Halbert et al., 1983)	TESTES DE CAMPO (Edger and Lapakko, 1985)
SUMÁRIO DO MÉTODO	Granulometria -2.38 mm; 200g de rocha exposta a três dias de ar seco, três dias de ar húmido, e lavagem no sétimo dia.	Granulometria não referida; A água que passa através da amostra é destilada e recirculada; T=25° C (Sullivan and Sobek, 1982); T=70° C (Singleton and Lavkulich, 1978).	Granulometria variável; As colunas contendo resíduos mineiros são lixiviadas com volumes discretos ou com soluções recirculadas.	Granulometria -400 mesh; Adiciona-se 15-30g a uma solução ativa de bactérias a pH entre 2,2 e 2,5, T=35 °C; Se o pH aumenta a amostra não produz ácido; Se o pH diminui, 1/2 da massa original da amostra é adicionada em cada um dos dois incrementos.	Granulometria -200 mesh; Polpa amostra/água agitada = 200g/500 mL.	Partículas à escala do campo; Pilhas de teste de 800 a 1300 toneladas sobre fundo impermeabilizado; Boa qualidade dos dados.
VANTAGENS	Modela bem a AP e a NP; Modela humificação/secagem; Aproxima-se das condições do campo e da intensidade da acidez por unidade de amostra.	Simples; Resultados num tempo curto; Estimativa da interação entre geração e neutralização da acidez.	Modela a AP e a NP; Modela efeito de diferentes tipos de rocha; Modela humificação / secagem, e modela diferentes granulometrias.	Utilização simples; Custos baixos; Determina o potencial da biolixiviação.	Permite analisar muitas amostras simultaneamente; Equipamento relativamente simples.	Utiliza resíduos mineiros reais em condições ambientais; Pode ser utilizado para determinar o volume de drenagem; Os métodos de mitigação podem ser testados.
DESADVANTAGENS	Utilização moderada; A obtenção de resultados é lenta; Equipamento especial; Facilidade moderada de interpretação; Gera grandes conjuntos de dados.	Utilização moderada; Precisa equipamento especial; Interpretação moderada; Em estágio de desenvolvimento e relacionamento não claro com os processos naturais.	Interpretação difícil; Não é prática para um número de amostras elevado; Gera perda de dados; Tempo longo de realização; Problemas potenciais: lixiviações irregulares e canalização.	Utilização moderada; Exige um tempo longo; É necessário algum equipamento especial; Difícil interpretação se as alterações de pH são pequenas; Não modela o passo inicial de AP; O pH demora tempo a estabilizar.	Sujeita a erros de amostragem grandes; Falta de precisão.	Construção inicial cara; Tempo longo.

2.3 Concreto

O material de construção mais utilizado é o concreto. Não há material mais consumido pelo homem em tamanha quantidade, com excessão da água (Brunauer e Copeland apud Mehta & Monteiro, 2008).

O concreto é o material resultante da mistura de agregados, aglomerantes, água e dependendo da utilidade, do uso de aditivos e adições minerais. Após a confecção, este deve apresentar plasticidade e coesão suficiente para operações de manuseio, seja ela manual ou por máquinas produtoras de pré-fabricados, adquirindo resistência no decorrer do tempo em função da reação química do cimento com a água (hidratação), oferecendo forte ligação com os agregados (Neville, 1997).

De acordo com Petrucci (1981), para obter um concreto durável, resistente, econômico e de bom aspecto, é importante os estudos:

- Das propriedades de cada um dos materiais componentes;
- Das propriedades do concreto e dos fatores suscetíveis de alterá-las;
- Do proporcionamento correto e da execução cuidadosa da mistura em cada caso, a fim de obter as características impostas;
- Dos meios de transporte, lançamento e adensamento compatíveis com a obra;
- Do modo de executar o controle do concreto durante a preparação e após o endurecimento, a fim de capacitar-se do atendimento das características exigidas, tomando os cuidados devidos em caso contrário.

A Tabela 7 apresenta fatores relacionados à obtenção das qualidades essenciais ao concreto (facilidade de emprego quando fresco, resistência mecânica, durabilidade, impermeabilidade e constância de volume após endurecido e economia).

Tabela 7: Fatores relacionados à obtenção das qualidades essenciais ao concreto (Petrucci, 1981).

seleção cuidadosa dos materiais (cimento, agregado, água e aditivos) quanto a:	tipo e qualidade uniformidade
proporcionamento correto:	do aglomerante em relação ao inerte; do agregado miúdo em relação ao graúdo da quantidade de água em relação ao material seco do aditivo em relação ao aglomerante ou à água utilizada
manipulação adequada quanto a:	mistura transporte lançamento adensamento
cura cuidadosa	-

2.4 Blocos de concreto para pavimentação

Os concretos possuem características bem próprias e diversificadas, mas podem ser classificados em dois grandes grupos: os concretos plásticos e os concretos “secos”. Dentre os concretos plásticos se destaca o concreto convencional, o concreto fluido e o concreto graute. Entre os concretos “secos”, encontra-se o concreto projetado, utilizado em contenção de encostas e em túneis, o concreto utilizado na confecção de blocos, tubos, pavimentos e o concreto compactado a rolo, utilizado na construção de barragens (Frasson Junior, 2000).

Amadei (2011) afirma que o concreto seco caracteriza-se por ter uma baixa relação água/materiais secos, grande consistência (slump zero), alta coesão e pelo modo com que o ar aprisionado é retirado, ou seja, através de equipamentos de compactação.

Os blocos de concreto para pavimentação (BCP) (também chamados de *pavers*) compõem os pavimentos intertravados e constituem uma brilhante e eficaz solução para uso em ruas, calçadas, calçadões e praças, sendo hoje largamente difundido no Brasil. Os primeiros BCP foram produzidos na Alemanha no final do século XIX e já havia nesta época uma preferência muito significativa por esse produto (Meyer, 1981 apud Pettermann, 2006). De acordo com Schackel (2003), após a popularização da utilização dos blocos de concreto em âmbito global, a maioria das regiões que já utilizavam amplamente essa tecnologia expandiu o seu mercado regional, especialmente a América do Norte. No Brasil, a técnica de pavimentação com blocos cimentícios surge nos anos 70, ainda bastante incipiente e muitas vezes sem obedecer a critérios técnicos mínimos. (Hallack, 2001 apud Serafim, 2010).

O processo de assentamento das peças garante a esse tipo de pavimentação uma de suas características mais importantes, o intertravamento. O intertravamento é definido por ABCP (2010) como:

A capacidade que os blocos adquirem de resistir a movimentos de deslocamento individual, seja ele vertical, horizontal ou de rotação em relação a seus vizinhos. Para que se consiga o intertravamento duas condições são indispensáveis: contenção lateral e junta preenchida com areia.

Dessa maneira, o intertravamento acontece em função de um sistema de assentamento das peças, e para que ele ocorra, todo esse sistema deve estar integrado de maneira eficiente.

No início da década de 1980, a produção anual mundial já ultrapassava 45 milhões de metros quadrados, sendo 66% deste total aplicados em vias de tráfego urbano. No Brasil as utilizações dos BCP ficam restritas em pátios de manobras de empresas, em condomínios particulares. A indústria mundial de fabricação de blocos de concreto para pavimentação no final da década de 1990 chegou à impressionante marca de produção de 100 m² por segundo durante os dias úteis de trabalho (Purificação, 2009).

O ganho progressivo de espaço da produção de blocos de concreto como solução para pavimentação de áreas urbanas é justificado por Pagnussat (2004), o qual afirma que o

aumento dos esforços de empresas e entidades representativas do setor em incentivar a utilização dos blocos e as suas vantagens técnicas são fatores-chave. Para Schackel (2003), o sucesso da utilização dos blocos de concreto para pavimentação em âmbito mundial é amparado pela pesquisa competente a respeito dessa tecnologia.

Hallack (2001) apud Serafim (2010) descreve características favoráveis ao uso dos blocos de concreto intertravados, tais como: qualidades estéticas, versatilidade do material, facilidade de estocagem e ainda destaca outras características importantes:

- Permitem o uso imediato do pavimento logo após seu assentamento;
- Possuem capacidade para manter a sequência do pavimento mesmo quando sujeitos a acomodações do subleito;
- Possibilitam fácil reparação, facilidade de acesso às instalações subterrâneas sem marcas aparentes, reutilização das peças, fácil execução, alta resistência a abrasão, resistência ao ataque de óleos e combustíveis, baixa manutenção;
- Não há exigência de mão-de-obra e/ou equipamentos especiais, facilidade na incorporação de sinalização horizontal em função das peças coloridas;
- Apresentam menor absorção de luz solar, além de ser o pavimento mais permeável, o que proporciona a microdrenagem das águas pluviais.

Todas as características relatadas acima são consideradas para pisos intertravados compostos de material cimentício, ou mais especificamente o cimento Portland.

O fato dos blocos serem fabricados em peças pré-moldadas também se traduz em economia de recursos. O pavimento pode ser instalado e removido a qualquer tempo, praticidade quando se pensa no grande número de subsistemas existentes sob o calçamento. O pavimento intertravado permite que obras de manutenção e infraestrutura sejam realizadas sem a necessidade de quebra do piso, além de não gerar resíduos sólidos e não exigir insumos para sua recomposição (ABCP, 2009).

Existem várias tipologias de blocos de concreto intertravados, considerando sua forma e cor. A ABCP (2009) aponta três tipos diferentes:

- Tipo 1: peças de formas retangulares, com dimensões aproximadas de 20 cm de comprimento e 10 cm de largura, sendo que suas laterais podem ser retas, curvilíneas ou poliédricas. Possui facilidade na produção e no assentamento e proporciona facilidade na criação de detalhes dos pavimentos.
- Tipo 2: em geral, as peças possuem o formato de “I”, sendo assentadas sempre em fileiras. Usualmente, suas dimensões de 20 cm de comprimento e 10 cm de largura.
- Tipo 3: em função de seu peso e tamanho, os blocos do “tipo 3” não podem ser apanhados com uma única mão. Suas dimensões aproximadas são de 20 cm x 20cm.

A Figura 7 apresenta as três tipologias de blocos de concreto intertravados. No entanto, é comum verificar blocos fabricados em diferentes formas.

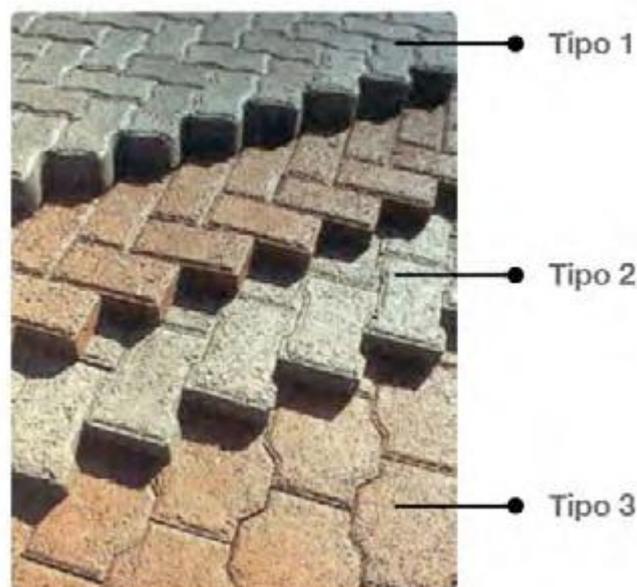


Figura 7: Tipologias de blocos de concreto intertravados (ABCP, 2009).

2.4.1 Características desejadas dos blocos de concreto para pavimentação

Certos aspectos a respeito do bloco de concreto para pavimentação devem ser considerados durante o seu projeto, tais como resistência à compressão, forma, espessura e tolerância na dimensão.

Resistência à compressão

Mehta & Monteiro (2008) definem a resistência de um material a capacidade de este resistir à tensão sem ruptura, sendo que a ruptura é algumas vezes identificada com o aparecimento de fissuras. Ou seja, no caso de concretos, a resistência está relacionada com a tensão requerida para causar a fratura e, também, ao grau de ruptura no qual a tensão aplicada alcança seu valor máximo.

A resistência à compressão dos BCP é o principal parâmetro de controle de qualidade dos blocos (Shackel, 1980 apud Pettermann, 2006). Conforme a NBR 9781 (ABNT, 1987), a resistência característica estimada à compressão dos BCP, calculada de acordo com as prescrições da NBR 9780 (ABNT, 1987), deve ser 35 MPa para solicitações de veículos comerciais de linha ou 50 MPa quando houver tráfego de veículos especiais ou solicitações capazes de produzir acentuados efeitos de abrasão.

Conforme Oliveira (2004) a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) adotou o ensaio de carregamento parcial como sendo o método de ensaio normalizado para a determinação da resistência à compressão dos blocos empregados em pavimentação. Este ensaio é feito por meio de placas auxiliares circulares (NBR 9780:1987) colocadas em contato com as duas faces da peça e perfeitamente alinhadas, simulando um “puncionamento duplo”.

Para tentar minimizar as influências das dimensões dos BCP nos resultados do ensaio, é necessário que se adote fatores de correção em função da altura dos mesmos. “Os blocos com 80 mm de altura nominal foram tomados como padrão (fator de correção igual a 1,0) e para os blocos com altura nominal de 60 mm e 100 mm foram aplicados fatores de minoração e majoração, respectivamente” (Oliveira, 2004).

Abrasão

Para BCP submetidos ao tráfego intenso haverá desgaste à abrasão com o passar do tempo. O grau do desgaste pela abrasão dependerá do tráfego de veículos e pedestres, do tipo de agregado utilizado, da quantidade de cimento, da proporção de agregados miúdos e graúdos, do controle durante a produção e da cura inicial. Contanto que os BCP apresentem resistência à compressão suficiente, o desgaste pela abrasão não afeta a integridade estrutural do pavimento. Além disso, o grau de abrasão diminui com o tempo (Concrete Manufacturers Association, 2004).

Formato do bloco

Pesquisas mostram que o tipo 1 da Figura 7 apresentam melhor resistência à deformação vertical e horizontal e geralmente são recomendados para todas as aplicações industriais e onde haja movimentação de veículos pesados (Concrete Manufacturers Association, 2004).

Espessura

A espessura dos blocos de concreto para pavimentação varia entre 50 e 80 mm. Quanto mais espesso o bloco, maior será a sua resistência às deformações vertical e horizontal. No entanto, há uma implicação de custos e a seleção da espessura deve ser baseada na aplicação. Geralmente blocos com 50 a 60 mm de espessura são adequados. Para uso industrial, blocos com espessura de 80 mm são recomendados. A prática tem demonstrado que os benefícios ganhos com blocos com espessura maior do que 80 mm são mínimos. No entanto, tais blocos podem ser produzidos para aplicações especiais (Concrete Manufacturers Association, 2004).

2.4.2 Fatores determinantes na qualidade dos blocos de concreto para pavimentação

Uma visão global da tecnologia dos blocos de concreto para pavimentação é apresentada na Figura 8. Schackel (2003) afirma que, em termos gerais, a tecnologia pode ser dividida em quatro áreas:

- Fabricação dos blocos de concreto para pavimentação, controle de qualidade e normas;
- Avaliação da tecnologia através da sua aplicação e estudos de caso;
- Projeto dos blocos de concreto para pavimentação;
- Instalação e manutenção dos blocos de concreto para pavimentação.

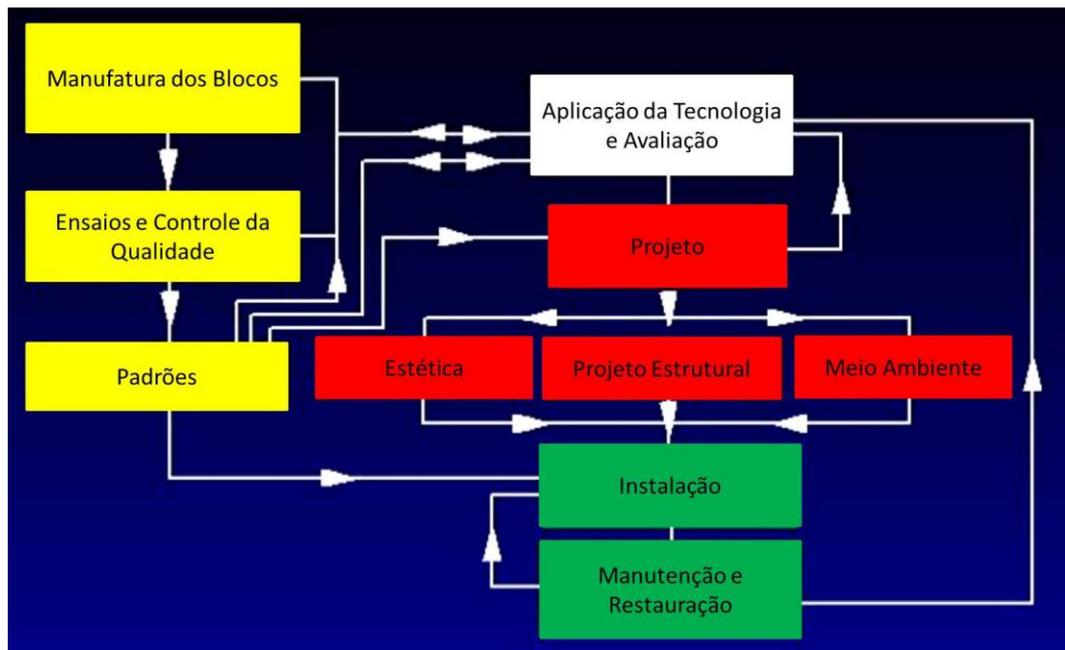


Figura 8: Tecnologia dos blocos de concreto para pavimentação (Schackel, 2003).

Além da influência exercida pelos agregados sobre a qualidade do concreto (ver item 2.6), diversos outros fatores, tais como cimento, equipamentos utilizados e mão-de-obra também podem exercer influência sobre o concreto, e conseqüentemente, sobre a qualidade dos blocos de concreto para pavimentação. Os diferentes tipos de concreto podem ser afetados de maneiras distintas pelos fatores inerentes ao processo e materiais empregados. A produção dos blocos (concretos secos) possui algumas peculiaridades quando comparada a outros tipos de concretos. Alguns fatores são mais críticos na obtenção de blocos com as características desejáveis.

Para Frasson Junior (2000), para alcançar a qualidade necessária para os blocos de concreto para pavimentação, é necessário unir a boa técnica de fabricação aos equipamentos adequados. A produção de peças de boa qualidade começa com a escolha adequada de cada um dos equipamentos que compõe uma pequena indústria.

Conforme Rodrigues (1995), os equipamentos básicos necessários à produção de blocos pré-moldados de concreto são os seguintes:

- Misturador – existem dois tipos: o de eixo horizontal e o de eixo vertical. O primeiro não é ideal para as misturas secas, como as utilizadas na fabricação dos blocos;

- Balança de agregados – traz a vantagem de propiciar uma produção de concretos de qualidade mais constante, permitindo a utilização de misturas com menores teores de cimento. Ela evita as influências negativas causadas pela umidade da areia, que são problemáticas quando a medida é feita em volume;
- Equipamentos de moldagem – são geralmente de dois tipos: os vibratórios e os vibro-compactadores. Os primeiros não são os mais indicados, uma vez que exigem, para a moldagem, misturas ricas em cimento, enquanto que os vibro-compactadores, possuindo dispositivo de compactação, além do de vibração, para moldar peças com menores consumos de cimento. Eles produzem peças com melhor acabamento superficial, portanto de maior resistência ao desgaste.

Sem considerar a variação do equipamento utilizado, Dowson (1998) discorre acerca do efeito gerado em decorrência da variação dos materiais (agregados, cimento e água) e das etapas do processo produtivo (adição da água, mistura, moldagem, cura, acabamento e controle da qualidade). A distribuição granulométrica dos agregados e o tipo de cimento empregado afetam diretamente a qualidade dos blocos. A dosagem de cimento para fabricação de concretos secos é crítica, já que a baixa quantidade de água pode impedir a sua ativação e acabar agindo apenas como um *filler*. Água em excesso pode comprometer a resistência e acabamento do bloco. A Figura 9 apresenta um exemplo de blocos moldado com excesso de água.



Figura 9: Bloco obtido a partir de concreto produzido com excesso de água (Pagnussat, 2004).

Se pouco cimento é usado, a resistência e a durabilidade ficam comprometidas. A variação do conteúdo de água, além de afetar a textura, a resistência e a durabilidade, possui

influência sobre a cor dos blocos. A perda de peso da massa deve ser evitada durante a adição da água à mistura. A mistura deve ser consistente e distribuir efetivamente todos os materiais no misturador, o qual deve ser alimentado com 60% a 75% da sua capacidade. A moldagem consiste em preencher as células com concreto e compactá-lo. Havendo inconsistência na forma como essa etapa é realizada, a densidade dos blocos poderá variar após a compactação. A umidade relativa e a temperatura do ar do ambiente de cura podem ocasionar variações na resistência e na coloração dos blocos. Mesmo havendo normatizações para realização dos testes de qualidade, ainda ocorrem variações capazes de influenciar a qualidade do produto final. A minimização da maioria dessas variações é assegurada quando empregados sistemas de gestão da qualidade (Dowson, 1998).

2.5 Processo de solidificação/estabilização de resíduos

A solidificação/estabilização, comumente abreviada por S/S, é uma tecnologia de tratamento amplamente utilizado para prevenir a migração e exposição de contaminantes a partir de um meio contaminado (isto é, solo, lamas e/ou sedimentos). Solidificação refere-se a um processo que liga um meio contaminado a um reagente alterando as suas propriedades físicas pelo aumento da resistência à compressão, redução da sua permeabilidade e encapsulamento dos contaminantes para formar um material sólido. Estabilização refere-se ao processo que envolve reações químicas que reduz a lixiviabilidade de um resíduo, de modo que os resíduos são quimicamente imobilizados a sua solubilidade é reduzida, tornando-se menos prejudiciais ou menos móveis. O tratamento por S/S normalmente envolve a mistura de um agente de ligação com os resíduos ou meios contaminados. Estas técnicas são feitas *in situ*, por injeção do agente ligante nos meios contaminados, ou *ex-situ*, por escavação dos materiais e mistura com o agente ligante através de máquinas (EPA, 2009).

De acordo com Chandler et al. (1997), os objetivos dos processos de S/S incluem: (1) reforço das propriedades físicas; (2) aumento do tamanho das partículas aglomeradas para reduzir a interação com a água; (3) sólidos com nenhum líquido; (4) melhora das características de manuseio; (5) redução da mobilidade dos contaminantes.

Os tipos comuns de materiais ligantes utilizados são ligantes orgânicos, que incluem asfalto, argila organofílica, ou carvão ativado; e ligantes inorgânicos, que podem incluir cimento, cinzas volantes, cal, fosfato, silicatos solúveis, ou enxofre. O produto resultante do processo de tratamento é um bloco monolítico de resíduo que é escavado e disposto em um

aterro ou reutilizado no local para recuperação da área (EPA, 2009). Devido à grande variação dos constituintes do resíduo e do meio, a formulação da mistura deve ser conduzida para cada tipo de resíduo. A maioria das misturas são combinações com os ligantes inorgânicos listados. Ligantes orgânicos são raramente utilizados em escala comercial devido ao seu alto custo comparado aos ligantes inorgânicos (Weitzman, 1989 apud Wilk, 2004). A Tabela 8 apresenta alguns ligantes típicos.

Tabela 8: Reagentes ligantes típicos (Chandler et al., 1997).

Resíduos	Produtos comercializáveis	Betume	Poliméricos
Poeiras de forno de cimento	Cimentos Portland	Emulsão quente	Epóxi
Escória granulada de alto-forno	Cal	Emulsão fria	Poliésteres
Poeiras do forno de cal	Calcário		Polioléfinas
Cinza volante de carvão mineral	Cal virgem		Ureia-formaldeído

O material utilizado para a S/S não só solidifica resíduos perigosos por meios químicos, mas também torna insolúvel, imobiliza, encapsula, destrói, absorve/adsorve, ou interage de outra maneira com os constituintes do resíduo. O resultado destas interações são materiais sólidos não perigosos ou menos perigosos do que o resíduo original. O grau de eficácia dos produtos do processo de S/S é definido basicamente por dois parâmetros: resistência do material e resistência à lixiviação (Malviya & Chaudhary, 2006).

Para determinar a eficiência de um processo de S/S, Lin et al. (1996) destacam que os seguintes fatores devem ser analisados: características de lixiviação, procedimentos de extração múltipla, resistência à compressão não confinada, densidade, permeabilidade e congelamento.

Conforme Chandler et al. (1997), os processos de solidificação são tipicamente projetados para reduzir a área superficial para um determinado volume de um resíduo, contribuindo ao mesmo tempo para na redução da porosidade no aumento da tortuosidade do material para minimizar a liberação de contaminantes para o meio ambiente. Conseqüentemente, o simples ato de aglomerar pequenas partículas de materiais em partículas sólidas maiores reduz a área exposta e dessa forma reduzir a taxa de lançamento de contaminantes.

Com relação às alterações químicas, Chandler et al. (1997) citam que processos de solidificação geralmente resultam em alterações químicas que incorporam água ao sólido através de reações químicas e podem ligar metais à matriz. Essas reações podem tanto reduzir

ou em alguns casos aumentar a lixiviabilidade de metais. A incorporação química de metais ao sólido inclui a transformação de sais metálicos solúveis em silicatos insolúveis, hidróxidos ou carbonatos, enquanto que outras alterações podem resultar na incorporação de um metal em um cristal por adsorção. A estabilidade química dos materiais submetidos ao processo de S/S depende da química da matriz e da solução lixiviada. Dissolução e desorção são os processos dominantes que influenciam a mobilidade de contaminantes, enquanto que os processos de imobilização e desmobilização concorrem em situações típicas de não equilíbrio, tais como as que ocorrem no ambiente natural.

Conforme Cocke et al. apud Vargas (2002), a tecnologia de solidificação/estabilização tem sido utilizada desde a década de 80 para manejar resíduos industriais e que, nesta tecnologia, empregam-se materiais selecionados (cimento Portland, cinza volante, calcário, entre outros) para alterar as características físicas e químicas dos resíduos classificados como não perigosos, a priori, para dispô-los em aterros ou transformá-los em novos produtos.

Segundo Roy et al. (1991), o cimento é o ligante mais utilizado e amplamente estudado. Solidificação com cimento é amplamente compreendida e simples, é facilmente disponível e resulta em um produto estável. De acordo com Malviya & Chaudhary (2006), outros ligantes (cimento Portland resistente a sulfato, cimento branco, pó de fornos, cinzas volantes (com teores de CaO superiores a 10%), cinzas de combustível pulverizado, silicatos, etc) substituem parcialmente o cimento comum, o que pode gerar um efeito positivo ou negativo na força, no tempo de reação e na hidratação.

De acordo com Glasser (1997), matrizes alcalinas produzidas com cimento Portland são comumente utilizadas no tratamento de resíduos porque elas são econômicas e possuem um histórico de aplicação amplamente documentado e tecnologia de fácil acesso. Conforme Chandler et al. (1997), as reações pozolânicas são exemplos de mecanismos de adsorção cristalina que oferecem potencial de imobilização de metais a longo prazo.

Quando empregado o cimento como ligante no processo de S/S, a caracterização química do resíduo é importante com o intuito de prevenir a ocorrência de efeitos deletérios ao concreto, principalmente quando o objetivo é a produção de um material comercializável. Nesse caso, a influência do resíduo sobre a resistência do concreto representa um ponto importante no processo de decisão de empregá-lo como matéria-prima.

A alcalinidade reduz significativamente a solubilidade de muitos compostos inorgânicos (tóxicos ou perigosos) e inibe os processos microbiológicos. Além disso, uma vez que estas matrizes de cimento necessitam de água para a hidratação, elas prontamente podem incorporar resíduos úmidos (Glasser, 1997). Já Wilk (2004) cita que a S/S através do cimento tem sido utilizada para tratar tanto resíduos com constituintes orgânicos quanto inorgânicos.

A Tabela 9 apresenta as vantagens e desvantagens das técnicas de S/S baseadas na utilização do cimento Portland.

Tabela 9: Vantagens e desvantagens das técnicas de S/S baseadas na utilização do cimento Portland (Chandler et al., 1997).

Vantagens	amplamente disponível a um custo razoável
	as técnicas de mistura e manuseamento estão bem desenvolvidas
	equipamentos necessários disponíveis
	a técnica é tolerante a variações químicas no resíduo
	a resistência e permeabilidade do produto final pode ser controlada pela quantidade de cimento adicionada no processo
Desvantagens	cimento aumenta consideravelmente o peso dos resíduos
	misturas de cimento e resíduos com baixas resistências são muitas vezes vulneráveis à lixiviação em soluções ácidas
	as matrizes de cimento e resíduo formadas não retém cloretos
	pré-tratamento do resíduo pode ser necessário devido a impurezas que podem afetar o assentamento e a cura do concreto

A adição de cimento ao resíduo geralmente reduz a condutividade hidráulica e porosidade do material tratado e aumenta a tortuosidade, durabilidade, resistência e volume. Ocorrida a cura do concreto, a taxa de liberação de contaminantes metálicos geralmente é baixa, desde que seja mantida a integridade física do material (Chandler et al., 1997).

No entanto, alguns contaminantes presentes nos resíduos que são imobilizados podem comprometer a integridade do concreto. A fim de que sua propriedade de imobilização de contaminantes seja mantida, o concreto gerado deve ter sua integridade mantida, ou seja, não deve possuir rachaduras, fragmentações ou outros danos físicos (Glasser, 1992). Conforme Mattus and Gilliam (1994), o maior risco para a ocorrência de tais danos provêm da formação de compostos expansivos formados por reações químicas entre o resíduo e o próprio cimento.

A caracterização química dos resíduos com vista à incorporação no concreto é necessária devido aos efeitos (deletérios ou não) que os constituintes do resíduo podem causar à qualidade do concreto produzido. A caracterização química deve ser conduzida para avaliação da viabilidade da incorporação de um determinado resíduo na matriz cimentícia.

No entanto, a incorporação de resíduos no concreto não possui uma norma específica no Brasil. Devido à grande diversidade de resíduos com potencial aplicação para tal propósito, somente as análises descritas na NBR 7211 (ABNT, 2005) não são suficientes para fornecer subsídios técnicos sobre a possibilidade de utilização de um determinado resíduo.

Os mecanismos de hidratação da pasta de cimento são uma série complexa de reações químicas, dissoluções, precipitações, trocas e cristalizações que pode ser alterados de muitas maneiras diferentes. A perturbação mais comum resultante da presença de espécies químicas alteradas provenientes dos resíduos é a inibição ou aceleração da taxa prevista de alguma fase do processo. É comum misturas de resíduos conter espécies químicas "problemáticas" que apresentam problemas para a hidratação do cimento ou para a estabilidade da forma final dos resíduos (Mattus e Gilliam, 1994).

Lea apud Mattus e Gilliam (1994) discute o efeito de vários sais na hidratação do cimento e afirma: “As informações disponíveis são muitas vezes conflitantes e o efeito produzido frequentemente varia com a composição do cimento Portland utilizado”.

Em sua revisão da literatura, Mattus e Gilliam (1994) citam os problemas encontrados quando da incorporação de resíduos no concreto: hidratação do cimento, estabilidade das especiações químicas do resíduo, e a capacidade de confinar espécies perigosas ou radioativas dentro da matriz.

Visando uma caracterização química inicial, Mattus e Gilliam (1994) propõem a análise de alguns parâmetros para a utilização do resíduo em concreto visando a técnica de S/S. A análise da água (ou a fase líquida) fornece os principais meios de interação entre os resíduos e o cimento. A Tabela 10 apresenta alguns parâmetros recomendados para análise no resíduo e seus respectivos limites. A escolha dos parâmetros a serem analisados pode ser definida de acordo com a procedência do resíduo. Análises adicionais são recomendadas quando verificada a necessidade.

Tabela 10: Análises requeridas para verificação da viabilidade de aplicação da tecnologia de S/S através do cimento (Mattus e Gilliam, 1994).

Parâmetros requeridos	Analisar em		Limites	
	Sólido	Líquido		
Umidade	x			
pH		x		
<i>TCLP¹</i>				
As	x	x	5	ppm
Ba	x	x	100	ppm
Cd	x	x	1	ppm
Cr	x	x	5	ppm
Pb	x	x	5	ppm
Hg	x	x	0,2	ppm
Se	x	x	1	ppm
Ag	x	x	5	ppm
<i>ICP²</i>	x	x		-
(Ag, Al, As, B, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Sb, Se, Si, Sn, Sr, Ti, V, Zn, Zr)				
<i>Ânions/Sais</i>				
Cloreto	x	x	1	% peso
Carbonato	x	x	1	% peso
Sulfato	x	x	1	% peso
Sulfeto	x	x	1	% peso
Sulfito	x	x	1	% peso
Nitrato	x	x	1	% peso
Nitrito	x	x	1	% peso
Hidróxido	x	x	1	% peso
Silicato	x	x	1	% peso
Borato	x	x	1	% peso
Fosfato	x	x	1	% peso
Fluoreto	x	x	1	% peso
<i>Material nuclear</i>				
²³⁴ U	x	x		pCi/g
²³⁵ U	x	x		pCi/g
U (natural)	x	x		pCi/g
U (empobrecido)	x	x		pCi/g
¹³⁷ Cs	x	x		pCi/g
²³⁰ Th	x	x		pCi/g
²³² Th	x	x		pCi/g
Carbono orgânico total			50	ppm

¹ procedimento padrão de lixiviação para determinação de toxicidade proposto pela EPA.

² espectrometria de emissão óptica em plasma (ICP) ou qualquer outro método analítico que forneça os componentes solicitados.

Testes de resistência muitas vezes são utilizados para fornecer um comparativo entre os resíduos em seu estado original e estabilizados. Os resíduos geralmente não apresentam boa resistência ao cisalhamento, no entanto, se os resíduos forem submetidos ao processo de S/S

através do cimento, é esperado um aumento significativo da resistência do sólido obtido (Cullinane et al., 1986)

De acordo com Pollard et al. (1990), a quantidade comumente utilizada de cimento para solidificação de resíduos varia entre 5% e 20%. Baixo teor de cimento não proporciona revestimento adequado de todas as partículas individuais dos resíduos, mas ainda assim pode proporcionar a fixação do resíduo e rigidez ao sólido. Pressupõe-se que isso seja resultante de alterações físicas provocadas pelo processo normal de hidratação do cimento, apesar da ocorrência do mecanismo “falso” de aumento de resistência (isto é, a precipitação de sais tais como o gesso, capaz de conferir resistência).

O efeito dos resíduos é estudado pela adição progressiva de resíduos ao cimento. Pequenas variações nos teores de adição de resíduos podem causar alta perda de resistência. Por exemplo, a incorporação de 1% (em massa) de Zn, Pb e Cd não afetou o desenvolvimento da resistência à compressão (Bobrowski et al. apud Malviya e Chaudhary, 2006). A adição de resíduos de galvanoplastia contendo 3% de Zn (em massa) resultou na redução de 99% da resistência do sólido aos 28 dias de cura (Hills e Pollard apud Malviya e Chaudhary, 2006).

Conforme Cullinane et al. (1986), a carbonatação é capaz de induzir a fixação dos constituintes do resíduo e o desenvolvimento de resistência em situações onde a hidratação é significativamente retardada. Produtos carbonatados no processo de S/S desenvolvem maior resistência em comparação com sólidos não-carbonatados.

Em muitos casos, o processo de S/S com o cimento Portland é aplicado com o objetivo de imobilizar constituintes perigosos do resíduo, e assim, possibilitar sua disposição final em aterros de forma segura. No caso do presente estudo, além de apenas prevenir a geração de DAM, objetiva-se atingir resistências satisfatórias que possibilite o emprego do concreto produzido na construção civil como pavimento intertravado.

2.6 Agregados

Entende-se por agregado o material granular, sem forma e volume definidos, geralmente em obras de engenharia. São agregados as rochas britadas, os fragmentos rolados no leito dos cursos d'água e os materiais encontrados em jazidas, provenientes de alterações de rocha (Petrucci, 1981).

Conforme Neville (1997), o agregado possui custo inferior ao cimento e, portanto, é econômico usar no concreto quantidades maiores de agregado e quantidades menores de cimento. Mas a economia não é a única razão de se usar o agregado, pois ele confere ao concreto vantagens técnicas consideráveis, as quais proporcionam ao concreto maior estabilidade dimensional e melhor durabilidade do que a pasta de cimento pura.

Os agregados podem ser classificados do ponto de vista de sua origem e, neste caso, se pode dividi-los em naturais e artificiais. Os naturais são aqueles que já são encontrados na natureza sob a forma de agregados, enquanto que os artificiais são aqueles que necessitam de aperfeiçoamento, como por exemplo a moagem, para possibilitar sua utilização. Alguns autores que ao classificarem os agregados em naturais e artificiais, colocam no primeiro grupo todos os anteriores, reservando o título de artificiais para escória britada, argila expandida e outros, que resultam de um tratamento industrial (Petrucci, 1981).

A classificação dos agregados de acordo com a dimensão das partículas, massa específica ou origem geraram uma terminologia especial. O termo agregado graúdo é utilizado para descrever partículas maiores do que 4,75 mm, e o termo agregado miúdo é utilizado para partículas com menos de 4,75 mm. A maioria dos agregados minerais naturais, como a areia e pedregulho, tem massa unitária de 1520 a 1680 kg/m³ e produzem concretos de densidade normal com aproximadamente 2400 kg/m³. Para fins especiais, agregados de menor ou maior densidade podem ser utilizados para a produção de concretos leves ou pesados, respectivamente. Os agregados com massa unitária menor do que 1120 kg/m³ costumam ser chamados de leves, e os que pesam mais de 2080 kg/m³ são chamados de pesados (Mehta & Monteiro, 2008).

2.6.1 Influência dos agregados miúdos sobre a qualidade do concreto

É muito importante saber da natureza dos agregados, uma vez que, em alguns casos, podem apresentar alterações de volume devido à variação de umidade, como também, reações com os álcalis presentes no cimento (Helene e Terzian, 1993).

Às vezes, essas influências são imediatamente perceptíveis, tais como quando um concreto fresco torna-se difícil de misturar. Mas em outros casos essas influências só se tornam aparentes com o tempo como, por exemplo, a reação álcalis-sílica, ou em circunstâncias especiais, com agregados que são menos resistentes ao fogo ou ao ataque químico (Hewlett, 2003).

Os agregados possuem propriedades químicas e físicas que podem ser benéficas ou prejudiciais à qualidade do concreto. Informações são apresentadas com maiores detalhes no item 2.5 sobre os parâmetros a serem observados quando da caracterização química de materiais a serem empregados na produção de concreto como agregados.

De forma simplificada, a Tabela 11 apresenta a relação das propriedades físicas do concreto com as características dos agregados.

Tabela 11: Influência das características físicas dos agregados nas propriedades do concreto (Sbrighi Neto, 2000).

Características do agregado	Propriedades do agregado
textura superficial limpeza forma dos grãos dimensão máxima	resistência mecânica
módulo de elasticidade forma dos grãos textura superficial dimensão máxima	retração
granulometria coeficiente de Poisson módulo de elasticidade	módulo de elasticidade
textura superficial forma dos grãos granulometria dimensão máxima disponibilidade	economia

De acordo com Hewlett (2003), algumas características do concreto afetadas pelas propriedades químicas e físicas dos agregados são apresentadas de forma sintetizada:

- **Trabalhabilidade do concreto fresco:** Agregados podem influenciar a trabalhabilidade do concreto de duas formas principais: (1) através da modificação das propriedades reológicas, em grande parte devido ao tamanho de partícula, da distribuição e da geometria; (2) por afetar o teor de água necessário para atingir um nível desejado de trabalhabilidade, novamente em grande parte devido a características das partículas e absorção.

- **Resistência à compressão e à flexão:** contanto que os agregados sejam mais resistentes do que o concreto no qual fazem parte, a sua força inerente não é suscetível de influenciar a resistência do concreto.

- Resistência ao desgaste: um concreto resistente ao desgaste é obtido através da utilização combinada de uma mistura de concreto de alta resistência e de um agregado que possua propriedades mecânicas adequadas.

- Reação álcali-agregado: A reação álcali-agregado pode ocorrer de duas formas principais: reatividade álcali-sílica (mais comum) e a reação álcali-carbonato. Um terceiro tipo, a reação álcali-silicato, tem sido descrita, mas representa uma forma mais complexa da reação álcali-sílica. A reação álcali-silicato é uma reação química entre o concreto e constituintes siliciosos específicos que por vezes ocorrem nos agregados e os hidróxidos alcalinos liberados durante a hidratação do cimento Portland. Uma série de diferentes tipos de reação álcali-carbonato têm sido identificadas, mas nem todas causam expansão.

- Retração e expansão do concreto: o principal efeito do agregado é impedir a contração da pasta de cimento e assim dissipar as tensões de encolhimento em toda a massa de concreto, ajudando a reduzir a probabilidade de ocorrência de fissuras. As propriedades do agregado que tendem a aumentar a demanda de água do concreto podem também fazer com que esses agregados se tornem menos eficazes na prevenção de encolhimento excessivo.

- Resistência ao congelamento e descongelamento: danos relacionados ao congelamento e descongelamento das superfícies de concreto estão associados com o congelamento do concreto saturado com água. Os agregados podem afetar a durabilidade ao congelamento e descongelamento diretamente, por ser suscetível ao congelamento, ou indiretamente, influenciando as propriedades do concreto endurecido.

- Resistência química do concreto: a capacidade do concreto para resistir ao ataque químico depende principalmente das propriedades do ligante hidráulico, incluindo o tipo de cimento, a presença de qualquer tipo de adições minerais, a relação água/cimento e o grau de compactação. O agregado pode, por vezes, influenciar negativamente a relação água/cimento e, assim, o teor de água, tornando assim o concreto mais permeável e, conseqüentemente, menos resistente a uma gama de ameaças à durabilidade.

- Resistência à ciclagem térmica e fogo: quando o concreto endurecido é exposto a temperaturas extremas (altas ou baixas), diferenças consideráveis no coeficiente de expansão térmica entre os agregados e a pasta de cimento podem causar rachaduras. O concreto é submetido a temperaturas extremas em algumas aplicações especiais (por exemplo,

revestimentos de chaminés), devido ao clima em algumas regiões do mundo e quando superfícies de concreto estão sujeitas ao fogo.

2.6.2 Parâmetros físicos

2.6.2.1 Forma e textura superficial do grão

Sabe-se que as características dos agregados têm significativa influência nas propriedades do estado fresco e endurecido do concreto. A forma e a textura superficial dos agregados, assim como a porosidade, a massa específica, a composição granulométrica, determinam, principalmente, as propriedades no estado fresco dos concretos e conseqüentemente exercem influência no consumo de pasta dos concretos. Verifica-se que quanto mais alongadas, angulosas e ásperas forem as partículas maior será o consumo de cimento da mistura (Mehta e Monteiro, 2008).

Do ponto de vista de resistência do concreto, as partículas angulosas são preferíveis, pois implicam melhor entrosamento entre as partículas individuais, contribuindo assim para a resistência do concreto. Por outro lado, partículas angulosas têm maior área superficial e exigem uma maior quantidade de água para a mesma consistência dos concretos, o que pode ocasionar uma diminuição na resistência à compressão (Farias e Palmeira, 2007).

A aderência também é afetada pela textura superficial e limpeza do agregado; a pasta normalmente adere melhor em uma superfície áspera e isenta de qualquer impureza do que em uma superfície lisa (Bicca, 2000).

O formato dos grãos dos agregados britados, bem como a sua granulometria, teor de material pulverulento e textura superficial dependem da origem mineralógica da rocha matriz e do tipo de equipamento empregado para a trituração da rocha. Quando são utilizados britadores do tipo cone, martelo ou rolo para obtenção dos agregados observa-se que os grãos dos agregados apresentam-se mais angulosos do que aqueles oriundos da britagem no britador do tipo girosférico de impacto vertical, também conhecido como VSI (Bispo e Almeida apud Fabro et al., 2011).

A Figura 10 apresenta duas formas para avaliação visual comparativa da forma das partículas.

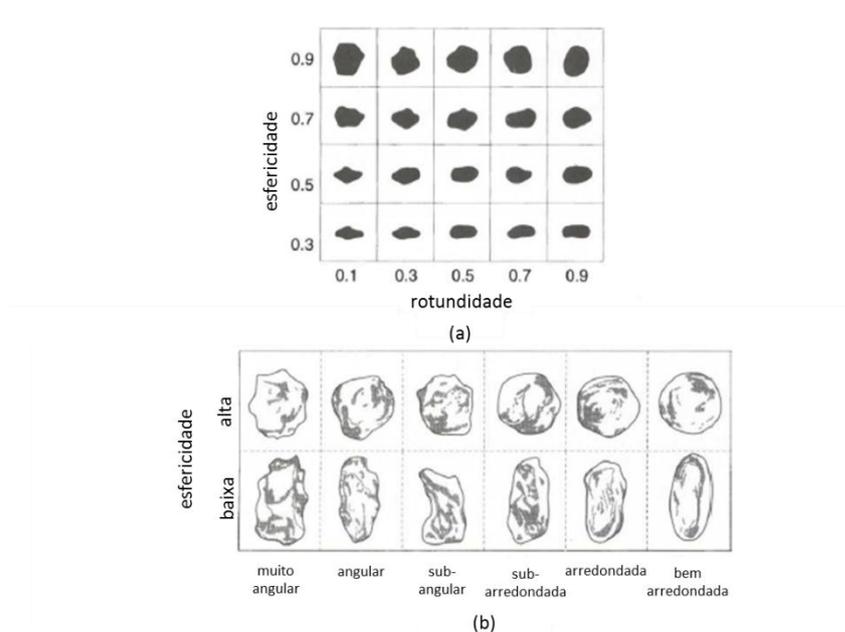


Figura 10: Avaliação visual comparativa da forma das partículas. (a) obtida pela medida da esfericidade e rotundidade. (b) baseada em observações da morfologia (Hewlett, 2003).

2.6.2.2 Granulometria e tamanho do grão

De acordo com Bicca (2000), a granulometria do agregado atua sobre diferentes propriedades do concreto, uma vez que sua alteração irá variar a trabalhabilidade e o consumo de cimento de um concreto.

A classificação da granulometria do agregado é importante para assegurar a coesão do concreto e a obtenção de uma densidade satisfatória por métodos de compactação normais. A influência da granulometria do agregado aumenta quanto menor a quantidade de cimento ou quanto maior necessidade de trabalhabilidade no estado fresco (Hewlett, 2003).

Conforme Hewlett (2003), a classificação granulométrica do agregado fino tem uma maior influência sobre as propriedades do concreto do que a do agregado graúdo. Areias com excesso de partículas grosseiras tendem a produzir uma mistura “áspera” com baixa trabalhabilidade e com tendência de formação de nata (perda de água durante a mistura ou moldagem do concreto). Por outro lado, areias com excesso de partículas finas pode aumentar significativamente a demanda de água na mistura devido sua maior área superficial, mas, concomitantemente, pode melhorar a coesão das partículas.

2.6.2.3 Porosidade e absorção

De acordo com Haynes apud Campiteli (1987), o volume de vazios nos agregados leves pode chegar a 60%, sendo, neste caso, relativamente grandes e interligados. Já nos agregados comuns o espaço de poros abertos pode chegar a 20%, sendo em geral de 0,5 a 5%.

Em algumas circunstâncias, tem sido considerado necessário estabelecer um limite para a absorção de agregado. Arnold e Littleton não identificaram aumento significativo da permeabilidade da água no concreto com o aumento da absorção de agregados com absorção de até 8%. Em alguns casos especiais, agregados porosos são benéficos (Hewlett, 2003).

2.7 Utilização de resíduos sólidos na construção civil

A prática da disposição final de resíduos, baseada na abordagem clássica conhecida como tecnologia de fim de tubo (*end-of-pipe*), onde não são consideradas as possibilidades de redução, reciclagem e reutilização, tem se mostrado ineficiente devido à crescente preocupação com a qualidade ambiental. A preocupação com as questões ambientais são evidentes quando considerada a legislação ambiental cada vez mais restritiva, a crescente pressão por parte da sociedade e o compromisso com a melhoria contínua dos processos conforme normas internacionais como a ISO 14001. Além disso, o aumento dos custos com disposição final e tratamento de resíduos também exerce papel fundamental na mudança da forma de gerenciamento dos resíduos.

Muitos resíduos possuem características que permitem sua reciclagem sendo convertidos em matérias-primas ou até mesmo características que permitam sua utilização sem nenhum tipo de processamento. Essa abordagem reduz a pressão sobre os recursos naturais e, muitas vezes, pode gerar benefícios econômicos atrativos. O setor da construção civil se apresenta como um promissor consumidor de resíduos gerados por outros processos devido à necessidade de grande quantidade de materiais, da diversidade de insumos utilizados e de redução dos custos de produção.

Muitas barreiras devem ser superadas antes que a utilização de qualquer material seja amplamente aceita para uso na construção civil. Estas incluem considerações econômicas, institucionais (políticas governamentais) e técnicas. A falta de requisitos técnicos, bem como o excesso de restrições para o uso de resíduos na construção civil, pode desestimular essa prática (Clifton et al., 1980). De acordo com Numata apud Pozzobon e Ruppenthal (1999),

podem ser consideradas dificuldades para a utilização de resíduos na construção civil as seguintes questões:

- Falta de controle de qualidade (variabilidade inerente) do material e de aplicação do conceito garantia;
- Inadequação das especificações e normas técnicas;
- Preocupação quanto as responsabilidades civis nas inovações tecnológicas;
- Insuficiência de pesquisa e desenvolvimento (P & D);
- Processos industriais e preços baseados em matérias-primas virgens e produtos convencionais;
- Resistência da construção em adotar novos materiais e novas tecnologias;
- Distribuição geográfica descentralizada de pequenas quantidades de resíduos;
- Custos de classificação, coleta, armazenamento e processamento;
- Falta de informação sistematizada, particularmente entre setores industriais ou de projeto de construções diversas;
- Restrições ambientais para a aplicação de resíduos em produtos convencionais.

De acordo com Chateau (2007), os geradores de resíduos precisam adotar a visão de “produto” ao invés de “resíduo”. E essa visão deve ser transformada em ação. O valor econômico agregado ao material é um argumento para justificar que este não é resíduo.

A Comunidade Europeia incentiva, pela diretiva 75/442/EC, a prevenção, reciclagem e recuperação de resíduos. Alguns países possuem regulamentações ambientais específicas quanto ao uso de resíduos na construção civil, conforme apresentado na Tabela 12.

Tabela 12: Regulamentações em vigor nos estados membros europeus sobre o uso benéfico de resíduos como material de construção (Chateau, 2007).

País	Regulamentação
Holanda	<i>Building Material Decree</i> – BMD – que abrange o uso de matéria-prima e resíduos.
Bélgica	Regulamento baseado na abordagem do BMD na região Flamenga e da Valónia da Bélgica para diferentes tipos de resíduos.
Dinamarca	Regulamento sobre a reciclagem de resíduos e solos em material de construção.
França	Circular sobre a disposição e uso das cinzas de incineradores de resíduos sólidos urbanos em construção de estradas e regulações relativas à areias de fundição para diferentes tipos de utilização.
Alemanha	Regulamentações técnicas relativas ao uso de resíduos e sub-produtos da mineração.
Itália	Regulamentação para utilização de resíduos baseada em parâmetros técnicos e em ensaios de lixiviação (para certos resíduos em algumas aplicações).

No Brasil, recentemente foi aprovada a Lei 12.305, de 2 de Agosto de 2010, que Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010). Nela, é denominado logística reversa o instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada. A utilização de resíduos na construção civil se enquadra como uma forma de logística reversa. A implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos foi um importante passo dado rumo à estruturação de um sistema de âmbito nacional que seja capaz de gerenciar os resíduos considerando a sua utilização, seja no próprio ou em outros processos produtivos. No entanto, no Brasil não há normas específicas que abordem a utilização de resíduos nos diversos setores da construção civil, tendo em vista que cada tipo de aplicação possui exigências técnicas bastante específicas. É evidenciada a necessidade de criação de normas específicas de utilização de resíduos na construção civil, como já praticado por outros países e apresentado na Tabela 12. A normatização pode, ainda, servir como um incentivo a essa prática.

Conforme Hammond (1988), nos últimos quinze anos, muitos países, incluindo Estados Unidos, Reino Unido, Holanda e outros da Europa, África e Ásia têm realizado pesquisas e avaliações de resíduos e sub-produtos industriais com vista à aplicação em outros processos. Além disso, organismos internacionais como a *Organization for Economic Co-operation and Development* (OCDE), a *International Union of Testing and Research Laboratories for*

Materials and Structures (RILEM), e o *International Council for Building Research Studies and Documentation* (CIB), bem como a *American Society for Testing and Materials* (ASTM), também desenvolveram pesquisas relacionadas à utilização de resíduos.

Diversos projetos de pesquisa foram conduzidos para avaliar ou demonstrar a viabilidade da utilização de resíduos como material de construção em aplicações rodoviárias ou em alguns casos até em edificações. Em alguns deles, a viabilidade ambiental tem sido estudada para fins diferentes e por abordagens diferentes (Chateau, 2007). No Brasil, isso se comprova pelos trabalhos publicados nos diversos congressos e workshops sobre reciclagem e utilização de resíduos na construção civil, como, por exemplo, o I Congresso Nacional de Resíduos e Reciclagem e as diversas edições de congressos do Instituto Brasileiro do Concreto e da Associação Brasileira de Engenharia Ambiental e Sanitária.

2.7.1 Utilização de resíduos sólidos de mineração de carvão na construção civil

Definitivamente, a aplicação mais utilizada dos rejeitos de carvão é como material de preenchimento e de aterro: (i) para a restauração de áreas próximas às minas e preenchimento de pedreiras abandonadas, terraplanagem e eliminação de irregularidades na superfície de canteiros de obras; (ii) preenchimento de canais abandonados e docas, (iii) aterro de minas, (iv) recuperação de áreas de disposição final de resíduos sólidos municipais (aterros sanitários). Outra grande área de utilização de resíduos da mineração de carvão é na aplicação como material de construção em estruturas hidráulicas e rodoviárias: em rios, em camadas de suporte para rodovias e ferrovias, em barragens, em obras portuárias, em cais, etc. Pequenas quantidades de resíduos de mineração são usados como matéria-prima para a fabricação de materiais de construção (Twardowska et al., 2004). A Tabela 13 apresenta alguns exemplos de aplicação de resíduos gerados na fabricação de carvão mineral.

Tabela 13: Aplicações de rejeitos de carvão mineral.

Utilização	Local de aplicação	Fonte
<p>Combustão em leito fluidizado circulante juntamente com carvão e biomassa.</p> <p>Rejeito de carvão sinterizado foi utilizado como base para pavimentos, exceto pela fração mais fina (lodo), que não possui capacidade de carga necessária para esse propósito. A solidificação/estabilização do resíduo através do cimento também pode ser utilizada para sua aplicação como base e sub-base de pavimentos.</p>	Estados Unidos	EPA, 2008
<p>Um estudo foi realizado a fim de provar a viabilidade técnica da utilização de resíduos de mineração de carvão como material de preenchimento em estruturas de solo reforçado. Um projeto em escala real foi desenvolvido com o objetivo de confirmar os resultados obtidos em laboratório e nos testes de corrosão e determinar as condições ideais de emprego dos rejeitos.</p> <p>Pesquisas foram desenvolvidas para avaliar a viabilidade da utilização dos rejeitos estabilizados com cimento em bases e sub-bases para pavimentos e as condições ótimas de utilização. Os resultados satisfatórios obtidos em laboratório motivaram a construção de um trecho de 4,5 km de uma rodovia em Asturias onde 53.000 t de rejeitos do beneficiamento do carvão estabilizados com 6% de cimento foram utilizados para formar a sub-base da rodovia.</p> <p>Rejeitos sinterizados, após britagem em granulometria inferior a 50 mm, puderam ser utilizados como agregados para formar sub-base de pavimentos que suportam qualquer tipo de tráfego. Rejeitos não sinterizados, após remoção dos grãos com granulometria inferior a 25 mm e britagem do restante do material em granulometria inferior a 50 mm, podem ser utilizados em estradas com tráfego de veículos leves e médios.</p> <p>Combustão do rejeito com 80% de cinzas em leito fluidizado circulante juntamente com carvão e biomassa.</p> <p>Substrato em culturas hidropônicas para produção de vegetais e produção de plantas ornamentais.</p>	Espanha	Canibaño, 1995
<p>Através da análise caracterização do rejeito (composição química, teor de enxofre, radiação e lixiviação, etc.) foi confirmada a viabilidade de sua utilização para recuperação de áreas degradadas como material de aterro sem que os limites das normas nacionais sejam ultrapassados.</p> <p>Combustão em leito fluidizado circulante.</p> <p>Construção de um parque ecológico sobre a área que servia de depósito para os rejeitos resultando na recuperação da área, na obtenção de benefício ambientais e econômicos e na proteção ambiental do local.</p>	China	Haibin e Zhenling, 2010
<p>Rejeitos de carvão utilizados nas misturas preparadas para produção de materiais cerâmicos para construção se apresentam como um material promissor para esse propósito. O teor de resíduos no lote pode atingir 50%. A qualidade dos produtos elaborados com os resíduos gerados na região de Moscou cumpre integralmente os requisitos normativos nacionais para tais produtos.</p>	Russia	Lemeshev et al., 2004

continua

Utilização		Local de aplicação	Fonte
Engenharia hidráulica	Construção de barragens em rios: construção de aterros em grandes rios, de diques de reservatórios de contenção de água industrial, e de lagoas de sedimentação de lodos, rejeitos e cinzas.	Vários	Skarzynska,1995
	Proteção de leitos de rios: a resistência a erosão é aumentada quando rejeitos são usados no leito do rio em torno de pilares, pilhas e estruturas deste tipo, onde possam haver fluxos turbulentos erosivos e ao longo de margens expostas à erosão.		
	Barragens e diques: muitos países têm utilizado com sucesso rejeitos de carvão em barragens e diques para represamento de cinzas volantes de carvão produzido a partir de suas usinas termelétricas.		
Engenharia portuária	Aterros e Preenchimentos: na Holanda, a aplicação de rejeitos como material de enchimento no fundo do mar tem sido notavelmente bem-sucedida. Na foz do rio Reno, as estruturas de suporte para a barragem na seção de Oostershelde foram contruídas com rejeitos de carvão.		
	Proteção da costa litorânea: no Reino Unido, rejeitos de carvão têm sido utilizados para um projeto de defesa da costa no leste de Kent, entre Deal e Sandwich, devido à inundações ocorridas na região.		
	Cais portuários: uma das aplicações mais bem conhecidas para rejeitos de carvão na Holanda é a sua utilização em cais de portos (abaixo, acima ou no nível da água).		
Engenharia de estradas e rodovias	Rejeitos não tratados: o uso de rejeitos não tratados como uma sub-base, bem como a sua incorporação nos taludes de estradas é amplamente aceito em muitos países. A compactação adequada do material elimina o risco de combustão espontânea.		
	Rejeitos estabilizados com cimento: para proporcionar resistência e durabilidade para tráfegos intensos de veículos os rejeitos são estabilizados por meio de uma variedade de materiais aglutinantes, tais como cimento, cal, betume ou alcatrão. O ligante mais utilizado é o cimento Portland. Pode ser utilizado como sub-base ou para estruturas subterrâneas cobertas por algum material selante como o alcatrão, por exemplo.		
	Aterro para ferrovias: aterros de ferrovias e de rodovias são bastante semelhantes. No Reino Unido há casos onde a aplicação de rejeitos de carvão como material para aterro de ferrovias foram utilizados com sucesso.		
Minação	Preenchimento de minas: por muitos anos o uso de rejeitos como o enchimento hidráulico em minas e túneis tem sido objeto de vários estudos e discussões. Uma das razões principais para limitação da sua utilização como enchimento tem sido a sua compressibilidade.		
Restauração de áreas abandonadas	Recuperação de áreas degradadas pela extração de agregados: o enchimento de locais de onde foram extraídos areia e cascalho, bem como de pedreiras abandonadas, utilizando rejeitos de carvão tem sido praticado no Reino Unido em larga escala.		
	Recuperação de áreas de módulos de rejeitos de carvão: em vários países é aplicada a utilização direta de rejeitos de carvão sem a presença de camadas superiores. Os resultados indicam bom crescimento das plantas e redução de 25% dos custos quando comparado a métodos convencionais de reabilitação de áreas.		

2.7.1.1 Parâmetros a serem observados na aplicação de rejeitos da produção de carvão mineral para fabricação de concreto

De acordo com Vázquez (1999) apud Gomides (2009), é primordial ter o conhecimento sobre a composição mineralógica dos agregados antes de utilizá-los na produção de concretos, sendo assim possível identificar os minerais potencialmente reativos presentes no agregado.

Com relação à composição granulométrica, em geral, os resíduos de mineração de carvão são compostos por: (a) rejeitos *run-of-mine* (geralmente rochas secas provenientes diretamente da mina, com tamanho entre 0 e 500 mm), (b) material lavado de granulometria grosseira (sólidos úmidos com tamanho entre 10 e 250 mm provenientes da separação densimétrica), (c) material lavado de granulometria fina (sólidos úmidos com tamanho entre 0,5 e 30 mm provenientes dos jigues), (d) lodo (sólidos com granulometria inferior a 0,1 mm provenientes do processo de flotação) (Twardowska et al., 2004).

Com relação à composição mineralógica e química, os principais componentes de resíduos são minerais de argila, de quartzo e de carvão. Minerais de argila são predominantemente aqueles que possuem estrutura não passível de inchamento: caulinita/ilita e menores quantidades de clorita. Componente abundante dos argilitos é o quartzo (até cerca de 20%) e carvão (grandes quantidades). O conteúdo de quartzo nos siltitos é mais elevado (até 30%), enquanto que proporções de argila e de carvão são claramente inferiores em argilitos. Componentes presentes em menores quantidades, mas comuns em resíduos de mineração de carvão, são feldspatos, micas e plagioclásios. Todos os tipos de rochas litológicas contêm quantidades menores de sulfeto de ferro (principalmente pirita e mais raramente marcasita) e minerais carbonatados: calcita, dolomita e siderita em diferentes proporções e concentrações. Estes minerais ocorrem comumente em todos os resíduos de mineração, enquanto que a presença, proporções e tipos de sulfeto e de minerais carbonatados determinam seu potencial de poluição (Twardowska et al., 2004).

No Brasil, de acordo com Soares et al. (2008), o beneficiamento de carvão das carboníferas, em sua maioria, é composto pelos circuitos de grossos e finos, gerando os denominados rejeitos R1, R2 e R3 e rejeitos finos. Os rejeitos R1, R2 e R3 apresentam material com *top size* na ordem de 37 a 25 mm, sendo os finos na ordem de 1 mm.

Basicamente, esses rejeitos/estéreis são formados por pirita, folhelhos, argilitos e carvão.

Conforme Hammond (1988), a variabilidade dos resíduos e o fato de que eles podem conter substâncias solúveis que podem lixiviar e causar danos à estrutura à qual são empregados ou poluir cursos de água são alguns fatores limitantes ao uso de resíduos de mineração de carvão.

A seguir são apresentadas informações sobre os efeitos da presença de matéria carbonosa e de sulfetos de ferro, como a pirita, em agregados utilizados na produção de concreto. Estes, quando presentes na composição do agregado, podem causar efeitos deletérios ao concreto.

2.7.1.1.1 Presença de sulfetos

Na natureza há uma variedade litológica e, conseqüentemente, de agregados contendo sulfetos em sua constituição mineralógica, quais sejam as formas, como por exemplo, pirita, pirrotita, marcassita, calcopirita, arsenopirita, esfarelita, galena, entre outros, sendo os citados os mais referidos pela literatura específica ao tema. (Gomides, 2009; Casanova et al., 1996).

Quando presentes em grande quantidade é possível identificar facilmente a olho nu a presença desses minerais metálicos em rochas. Em rejeitos gerados durante o beneficiamento do carvão mineral, é comum observar cristais de pirita associados às rochas. A Figura 11 apresenta os tipos de concreções piríticas presentes na camada de carvão, sendo facilmente visualizada a presença desse mineral. Os tipos de concreções piríticas presentes na camada de carvão são: (a) semi-compacta com material carbonáceo, (b) pirita compacta amorfa e pirita em pequenos cristais, (c) pirita em pequenos cristais mudando para pirita compacta com bandas, (d) pirita material carbonáceo intercamadado, (e) pirita compacta com bandas grosseiras e (f) pirita euédrica.

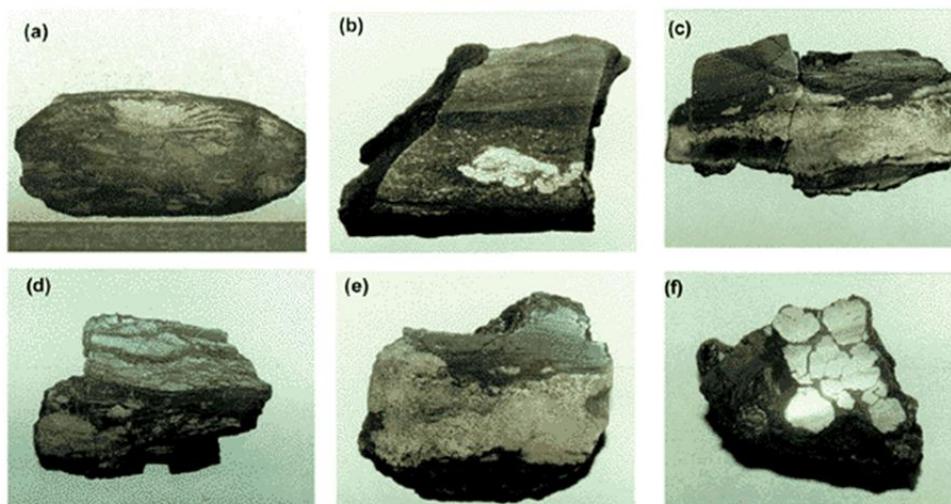


Figura 11: Tipos de concreções piríticas presentes na camada de carvão (Costa et al., 2001).

Conforme Casanova et al. (1997), o ataque por sulfato é um dos tipos mais comuns de deterioração do concreto. Danos em concretos submetidos a ataque de sulfato muitas vezes aparecem como rachaduras resultantes da formação de produtos expansivos. Em geral, é aceito que estas surjam a partir da reação de íons de sulfato que formam gesso, que, por sua vez, irá reagir com aluminato tricálcio a partir do cimento produzindo o monossulfoaluminato e/ou etringita. Segundo Roy (1986) apud Mattus e Gilliam (1994), rachaduras e fragmentações podem ocorrer como resultado da formação de etringita expansiva. Esta é proveniente de resíduos ricos em enxofre e que não tenham sido tratados a fim de reduzir a mobilidade e disponibilidade dos íons sulfato e a formação de mais compostos insolúveis de sulfato. A transformação de monossulfoaluminato em etringita é acompanhada por um aumento de volume de 77%. A Figura 12 apresenta uma digitalização de uma fotomicrografia eletrônica de ataque interno por sulfato em concreto. A imagem mostra a interface entre uma partícula de gesso (na parte superior) e a pasta de cimento (na parte inferior). Cristais de portlandita se desenvolveram (na parte superior, ao centro) associados com cristais pontiagudos de etringita.



Figura 12: Digitalização de uma fotomicrografia eletrônica de ataque interno por sulfato em concreto da região do Golfo Árabe (Hewlett, 2003) .

Muitos são os fatores que interferem diretamente na oxidação dos sulfetos. Gomides (2009), baseado em diversos estudos publicados a respeito, cita como principais parâmetros a concentração de oxigênio, a presença de umidade, a superfície específica do sulfeto, o teor de ferro contido no sulfeto, a presença de bactérias, a temperatura do ambiente, a morfologia do sulfeto e o pH do sistema.

De acordo com Casanova (1996) e Janzen et al. (2000), a pirita, juntamente com a pirrotita, são os sulfetos de ferro mais abundantes em rochas. A pirita e a pirrotita apresentam comportamentos semelhantes com relação à reação nos agregados. Conforme Schmidt et al. (2011), as reações de ambos os sulfetos se mostram bastante lentas. A Tabela 14 apresenta as reações predominantes de oxidação da pirita (FeS_2) e da pirrotita (FeS_{1-x}) em meio aquoso e suas respectivas variações de volume. Entretanto, a oxidação de sulfetos é bastante lenta quando comparada a outros tipos comuns de reações expansivas no concreto.

Tabela 14: Reações predominantes de oxidação da pirita e da pirrotita em meio aquoso e suas respectivas variações de volume. Reações da pirrotita equilibradas para $x = 0,125$ (Casanova, 1996).

	Reação	ΔV sólidos (cm^3 por mol de sulfeto)
1a	$\text{FeS}_2 + 9/2\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+$	209,96
1b	$8\text{Fe}_{1-x}\text{S} + 31/2\text{O}_2 + 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow 7(\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}) + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+$	187,08
2a	$\text{FeS}_2 + 9/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{FeOOH} + \text{SO}_4^{2-} + \text{H}^+$	-3,12
2b	$8\text{Fe}_{1-x}\text{S} + 67/4\text{O}_2 + 25/2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 7\text{FeOOH} + 8\text{SO}_4^{2-} + 16\text{H}^+$	0,64
3a	$\text{FeS}_2 + 17/4\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 1/2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+$	-8,81
3b	$8\text{Fe}_{1-x}\text{S} + 69/4\text{O}_2 + 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow 7/2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 8\text{SO}_4^{2-} + 16\text{H}^+$	-4,34
4a	$\text{FeS}_2 + 18/4\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 2\text{SO}_4^{2-} + \text{H}^+$	3,05
4b	$8\text{Fe}_{1-x}\text{S} + 21\text{O}_2 + 11\text{H}_2\text{O} \rightarrow 7\text{Fe}(\text{OH})_3 + 8\text{SO}_4^{2-} + 16\text{H}^+$	6,04

A NBR 7211 (ABNT, 2005) estabelece que o agregado miúdo deve apresentar quantidades de sulfatos inferiores a 0,1% em sua composição, devendo o ensaio ser realizado de acordo com a norma NBR 9917 (ABNT, 2009).

2.7.1.1.2 Teor de matéria carbonosa

Da mesma forma que ocorre com os sulfetos férricos associados, os rejeitos da mineração de carvão possuem carvão em sua composição devido ao processo de beneficiamento do carvão ROM. A presença de carvão na composição do agregado também pode se tornar um problema para a durabilidade do concreto, o que pode representar um impeditivo para a utilização do agregado.

Em algumas partes da Inglaterra, agregados naturais (miúdo e graúdo) contêm proporções variáveis de carvão e materiais correlatos, inclusive de xisto carbonoso. Carvões de baixo ranking (baixos teores de carbono) tais como carvão betuminoso e linhito, formam partículas fracas e porosas em agregados para concreto. O linhito, e mais raramente o carvão betuminoso, também podem prejudicar a aparência do concreto pelo surgimento de manchas nas superfícies expostas à água ou causar desgaste acentuado em placas de concreto submetidas à abrasão. Como resultado da presença de carvão, xisto carbonoso e linhito no agregado miúdo, esses efeitos foram detectados em telhas de concreto em algumas regiões da Inglaterra. A presença de carvão no agregado também é prejudicial devido ao fato de que o carvão é suscetível ao congelamento-

descongelamento, possui baixa resistência, alta absorção e pode expandir caso entre em contato com água (Hewlett, 2003).

O clínquer do forno, conhecido como *cinders* nos Estados Unidos e na Inglaterra, era o resíduo fundido ou sinterizado a partir da queima de carvão em altas temperaturas em fornos industriais ou proveniente das caldeiras das antigas usinas de geração de energia elétrica. Esse foi o primeiro agregado artificial a ser utilizado na Inglaterra. Com o surgimento das novas termoelétricas, o resíduo deixou de ser gerado. O material frequentemente possuía teores variados de carvão não queimado, além de compostos sulfurosos, anidrita, materiais refratários, partículas de xisto e pirita. A Figura 13 apresenta os efeitos deletérios (ocorrência de fissuras) devido à presença de carvão no agregado. A foto, tirada no início do século XX em um prédio em Londres, apresenta a placa de concreto no teto por onde a água infiltrada percolou. As fissuras são provenientes da expansão do carvão não queimado presente no agregado após entrar em contato com água.



Figura 13: Efeitos deletérios devido à presença de carvão no agregado (Hewlett, 2003).

Por outro lado, há casos onde a utilização de agregados contendo altos teores de carvão não queimado em sua composição não compromete a qualidade do concreto. De acordo com Hewlett (2003), a cinza de combustível pulverizada sinterizada (mais conhecidas como PFA) tem sido um dos agregados sintéticos mais amplamente

utilizados no Reino Unido ao longo dos últimos 30 anos. A composição cristalina do material consiste em mulita, hematite, quartzo e magnetita, com teores de 5 a 10% de carvão não queimado.

A NBR 7211 (ABNT, 2005) estabelece os seguintes limites para presença de matéria carbonosa em agregados miúdos: (a) 0,5% em concreto aparente; (b) 1,0% em concreto não aparente. Os limites referem-se à quantidade máxima relativa à massa do agregado miúdo, devendo o ensaio ser realizado de acordo com a norma ASTM C 123 (ASTM, 1998).

2.7.2 Resíduos sólidos na produção de blocos de concreto para pavimentação

Assim como nos demais ramos da construção civil, a prática do emprego de resíduos como materiais alternativos têm se mostrado promissora na fabricação de blocos de concreto para pavimentação. A Tabela 15 apresenta alguns estudos realizados sobre o emprego de resíduos na fabricação de blocos de concreto para pavimentação.

Tabela 15: Estudos de utilização de resíduos na fabricação de blocos de concreto para pavimentação.

Resíduo utilizado	Forma de incorporação do material ao concreto	Resultados obtidos	Fonte
Pó de aciaria elétrica a arco	Adição à massa de cimento, com teores de substituição de 0, 5, 15 e 25% de substituição. Na primeira etapa do estudo foi fixada a relação água/cimento e na segunda etapa foi fixado o teor de umidade (relacionado com a capacidade de moldar os corpos-de-prova.)	Nas duas etapas, os blocos contendo 15% de adição do resíduo obiveram melhor desempenho quanto à resistência à compressão axial. Com relação aos ensaios de eflorescência e ataque de íons cloreto, os blocos produzidos com o resíduo mostraram-se com desempenho igual ou superior aos blocos referência (0% de substituição). O resíduo retardou os tempos de início e fim de pega. O cimento agiu como formador de uma matriz para encapsular os metais pesados contidos no resíduo (Classe I - perigoso), já que o ensaio de caracterização ambiental mostrou que os blocos produzidos são classificados como Classe II (não-inerte).	Vargas (2002)
Resíduo de construção e demolição	Substituição parcial do agregado miúdo natural pelo resíduo em teores de 0%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45% e 50% de substituição.	Os resultados apontaram que o teor de 25% de substituição atingiu valores acima de 35 MPa aos 28 dias, além de apresentar valores satisfatórios nos ensaios de resistência à abrasão e absorção de água. Os índices de 30% e 35%, apesar de não atingirem a resistência determinada pela norma brasileira, apresentam resultados satisfatórios para serem empregados em locais que exijam baixas solicitações de tráfego.	Amadei (2011)
Resíduos de construção e demolição da indústria cerâmica e de pneus.	Utilização de 100% de agregados reciclados originados de rejeitos de concretos das concreteiras da região metropolitana de Belo Horizonte (volume de perda de 10%) e substituição de 0%, 10%, 20% e 30% do volume do cimento por resíduo de polimento de porcelanato.	Os ensaios realizados para avaliação da resistência à compressão, apresentaram resultados satisfatórios, indicando que as utilizações de agregados reciclados atuam de forma eficiente, sendo que a substituição de 20% do volume de cimento por resíduo de polimento de porcelanato apresentou o melhor desempenho.	Purificação (2009)
Escória granulada de fundição de ferro	Substituição parcial do cimento e do agregado miúdo natural pelo resíduo em teores de 0%, 10%, 30 e 50% de substituição.	O teor de 10% de substituição do cimento pelo resíduo foi o que mais se aproximou do desempenho dos blocos referência (0% de substituição). Os resultados demonstraram que não há diferenças significativas entre os blocos referência e os blocos com resíduo com relação aos ensaios de desgaste por abrasão e absorção de água.	Pagnussat (2004)
Resíduo de construção e demolição	Substituição parcial do agregado miúdo natural pelo resíduo em teores de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de substituição.	Verificou-se que o teor de 25% de substituição é passível de utilização para produção de blocos de concreto para pavimentação, enquanto que para os outros teores os resultados foram insatisfatórios.	Hood (2006)
Resíduos de galvanoplastia (poeira de jateamento e lodo)	Substituição parcial do cimento pelos resíduos em teores de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de substituição.	Os resultados dos blocos produzidos com a poeira de jateamento apresentaram redução na absorção de água em todas as proporções em relação aos blocos referência para todas as idades, além de aumento na resistência à compressão nos blocos com 5% de substituição em todas as idades com relação aos blocos referência. Apenas os blocos com 5% de substituição do cimento pelo lodo apresentaram valores de resistência à compressão superiores 35 MPa. No entanto, sua resistência à compressão foi inferior aos blocos referência (0%) aos 28 dias, além da redução na absorção de água com relação a todos os outros blocos.	Franco (2011)

continua

Resíduo utilizado	Forma de incorporação do material ao concreto	Resultados obtidos	Fonte
Areia de fundição não-fenólica	Substituição parcial do agregado miúdo pelo resíduo em teores de 0%, 13% e 25% de substituição. Os blocos foram produzidos utilizando equipamentos industriais que trabalham por vibração e por vibro-compressão.	Por vibração, e principalmente com a adição de resíduo (agregado miúdo), tem-se um aumento da área de transição pasta/agregado, resultando em um aumento de vazios e na formação de grandes cristais de Ca(OH)_2 , diminuindo a resistência mecânica. Por vibro-compressão obteve-se um melhor empacotamento das partículas, principalmente com a adição de resíduo, e uma diminuição da distância de transição pasta/agregado, eliminando a formação de grandes precipitados de Ca(OH)_2 e, por consequência, aumentando a resistência mecânica.	Watanabe et al. (2006)
Resíduo de recauchutagem de pneus	Substituição parcial do agregado graúdo pelo resíduo em teores de 0%, 8%, 10% e 12% de substituição.	Os ensaios de resistência à compressão nos blocos de concreto com incorporação de resíduos de borracha apresentaram valores mais baixos em comparação com os blocos sem resíduos. Na dosagem C (10% de resíduos), os resultados da absorção dos blocos foram menores que os blocos da dosagem A (sem resíduos). Nos ensaios de resistência ao impacto, o comportamento de ruptura dos blocos de concreto com adição de resíduos de borracha foi diferente do bloco sem resíduos.	Fioriti et al. (2007)
Cinzas de incineradores de lixo doméstico	Substituição parcial do agregado pelo resíduo em teores de 0%, 10%, 20%, 30% e 60% de substituição.	A utilização do resíduo em substituição aos agregados naturais é possível tecnicamente. A fração menos do que 3 mm deve ser removida antes do emprego do resíduo na fabricação de blocos de concreto para pavimentação. O resíduo deve ser desmetalizado de forma adequada e a fração orgânica do resíduo deve ser menor do que 5%. Os blocos produzidos com 20% de substituição atingiram as especificações normativas. No entanto, apenas uma quantidade limitada do resíduo pode ser aplicada para tal propósito.	Leenders (1984)
Cinzas da incineração de resíduo sólido urbano	Substituição parcial do cimento pelo resíduo em teores de 0%, 22,3% e 55,6% de substituição.	A utilização das cinzas na fabricação de blocos de concreto para pavimentação como substituto ao cimento afetou negativamente a resistência à compressão do concreto. No entanto a redução da resistência mecânica pode ser compensada pela quantidade de cimento no traço. O concreto produzido com 55,6% de substituição do cimento convencional pelo cimento reciclado (consumo de cimento de 466 kg/m ³) apresentou resultados semelhantes ao do concreto confeccionado sem o resíduo (blocos referência e consumo de cimento de 366 kg/m ³). Ensaios de lixiviação nos blocos de concreto apresentaram resultados satisfatórios quanto à lixiviação de contaminantes. Nenhum dos poluentes analisados excedeu os limites estabelecidos na legislação japonesa.	Tomaru e Nakamura (2009)
Resíduos de borracha (desemborrachamento de pistas de pouso e decolagens de aeronaves)	Substituição parcial do agregado miúdo pelo resíduo em teores de 0%, 25%, 59%, 75% e 100% de substituição.	O resultado encontrado aponta a proporção de 25% como a melhor para se produzir os blocos, pois possui características semelhantes aos blocos que não contem resíduo na sua composição.	Sousa et al. (2010)

Os assuntos abordados na revisão da literatura e a falta de estudos relacionados à utilização de rejeitos da mineração de carvão mineral na produção de concreto motivaram o desenvolvimento do presente trabalho.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O principal objetivo do trabalho é a verificação de viabilidade da substituição do agregado miúdo natural pelo rejeito beneficiado (fração inerte) na fabricação de blocos de concreto para pavimentação. Para tal estudo, foi necessário beneficiar o rejeito bruto, caracterizar o material obtido, fabricar os blocos e avaliar suas propriedades. Ainda, avaliou-se o teor de enxofre e do potencial de geração de acidez do rejeito bruto, do AMR e dos blocos de concreto; pois a presença de pirita no material pode gerar efluente ácido, com graves problemas ambientais, e o teor de enxofre pode ser um impeditivo para a fabricação do concreto. Todas essas etapas seguiram metodologias distintas.

A Figura 14 apresenta um esquema geral do desenvolvimento experimental do presente trabalho.

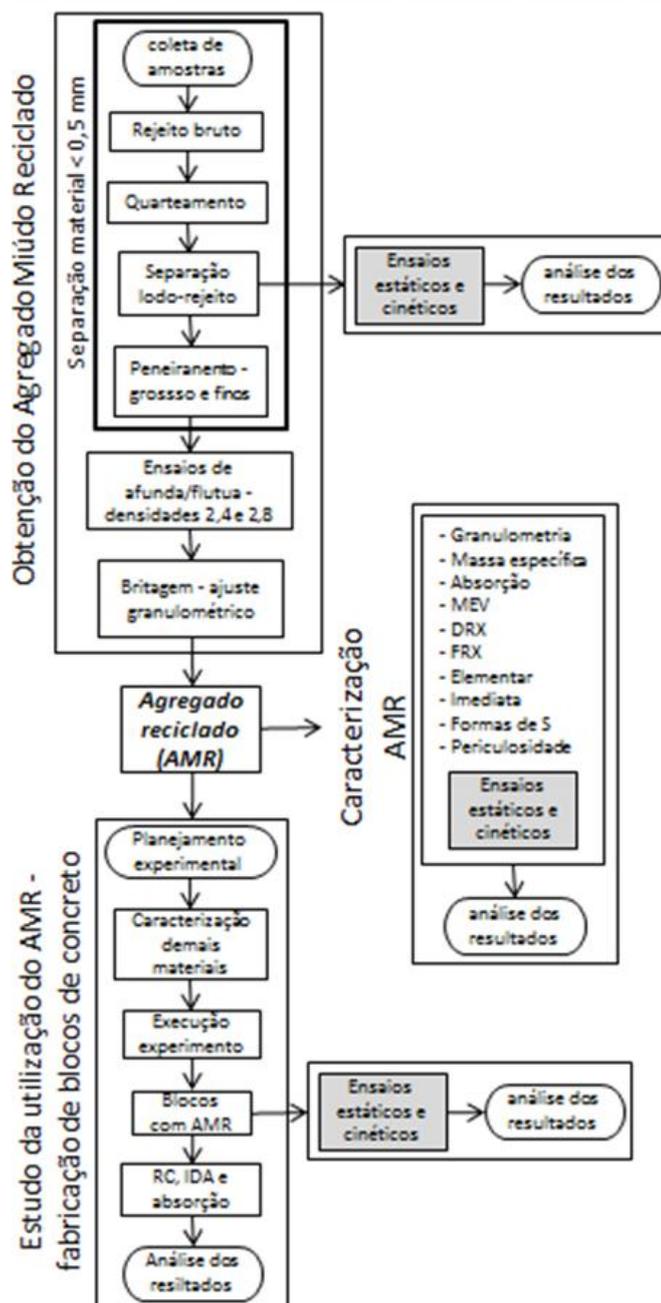


Figura 14: Detalhes da metodologia estabelecida.

3.1 O resíduo utilizado no estudo

O resíduo utilizado neste estudo é proveniente do módulo B de rejeitos da Carbonífera Criciúma S/A. O rejeito é gerado no beneficiamento do carvão e não possui utilização comercial. O módulo B está inserido na Unidade de Mineração II – Verdinho, Município de Forquilha, SC, em uma área de 1.200.000 m², compreendida pelas coordenadas geográficas 651400 a 653500 Leste e 6814850 a 68113600 Sul (Sistema Universal Transverso de Mercator - UTM), hidrologicamente posicionada na bacia

hidrográfica do rio Araranguá, drenada pelo Rio Sangão, afluente do rio Mãe Luiza (Schneider, 2006). As operações de lavra em escala industrial na UM II – Verdinho, tiveram início em junho de 1982, considerando instalações e equipamentos dimensionados para produzir 2.760.000 de toneladas anuais de carvão ROM (Schneider, 2006). Hoje em dia, estão dispostos no módulo B cerca de 14 milhões de toneladas de rejeitos oriundos das etapas de beneficiamento do carvão mineral da Camada Barro Branco. A Figura 15 mostra a vista superior na unidade mineira II da CCSA.



Figura 15: Vista superior do Módulo de Rejeitos da Carbonífera Criciúma (Cortesia: Carlos Henrique Schneider, 2009).

Existem variações naturais nas características geológicas do material mesmo dentro de uma mesma jazida. Para outras jazidas, pode-se esperar resultados semelhantes, mas outros estudos devem ser conduzidos para melhor avaliação.

O resíduo é gerado através do beneficiamento gravimétrico do carvão mineral. O processo utilizado é o de jigagem por via úmida. As três comportas de fundo do jigge são responsáveis pela remoção desta fração mais densa (R1, R2 e R3), material este destinado aos depósitos de rejeitos que estão setorizados nos módulos A e B (Schneider, 2006). A Figura 16 apresenta um fluxograma do processo de beneficiamento do carvão utilizado na Carbonífera Criciúma S.A.

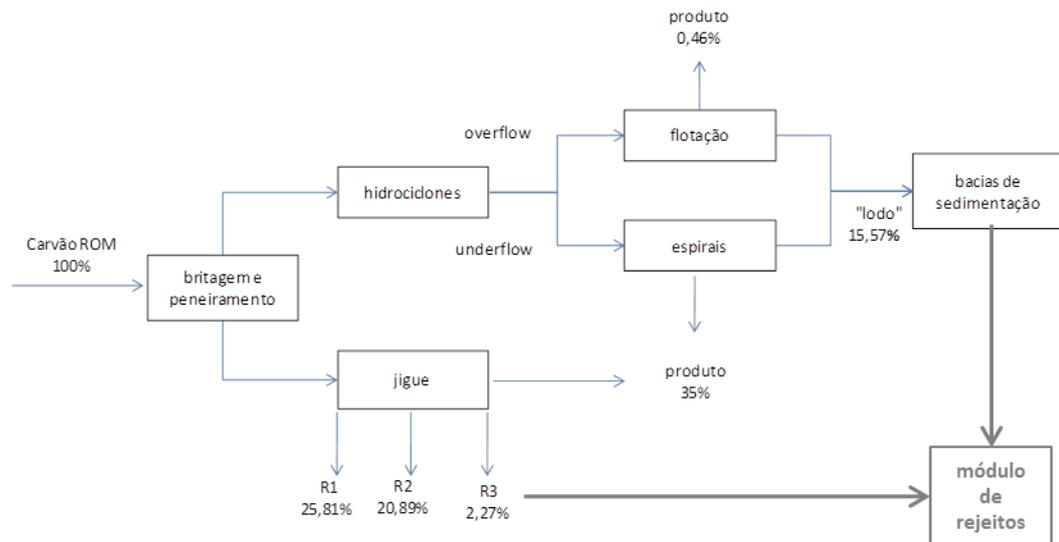


Figura 16: Fluxograma do processo de beneficiamento utilizado na Carbonífera Criciúma.

Conforme proposto por Schneider (2006), a fração de granulometria fina proveniente das bacias de sedimentação (lodo) é disposta juntamente com o material extraído das comportas de fundo do jigues (R1, R2 e R3) no depósito de rejeito material. O objetivo é reduzir o número de vazios e aumentar a compactação da pilha de rejeitos, resultando na redução da percolação de água e redução da geração de DAM

Como se pode observar na Figura 16, através do balanço de massa resultante do processo conclui-se que a maioria do material extraído da mina nas operações de lavra subterrânea (cerca de 65%) são dispostos como rejeitos.

3.2 Coleta de amostras

A Figura 17 apresenta detalhes da coleta do material. A amostragem foi realizada por meio de sondagem rotativa que atingiu até a base do aterro através de trado mecânico com diâmetro de 40 centímetros (a, b, c, d). A homogeneização material coletado foi feita na superfície (e, f). Por fim, cerca de 300 kg da amostra foram dispostos em bombonas plásticas e encaminhados ao Laboratório de Estudos Ambientais para Metalurgia (LEAMet) na UFRGS.

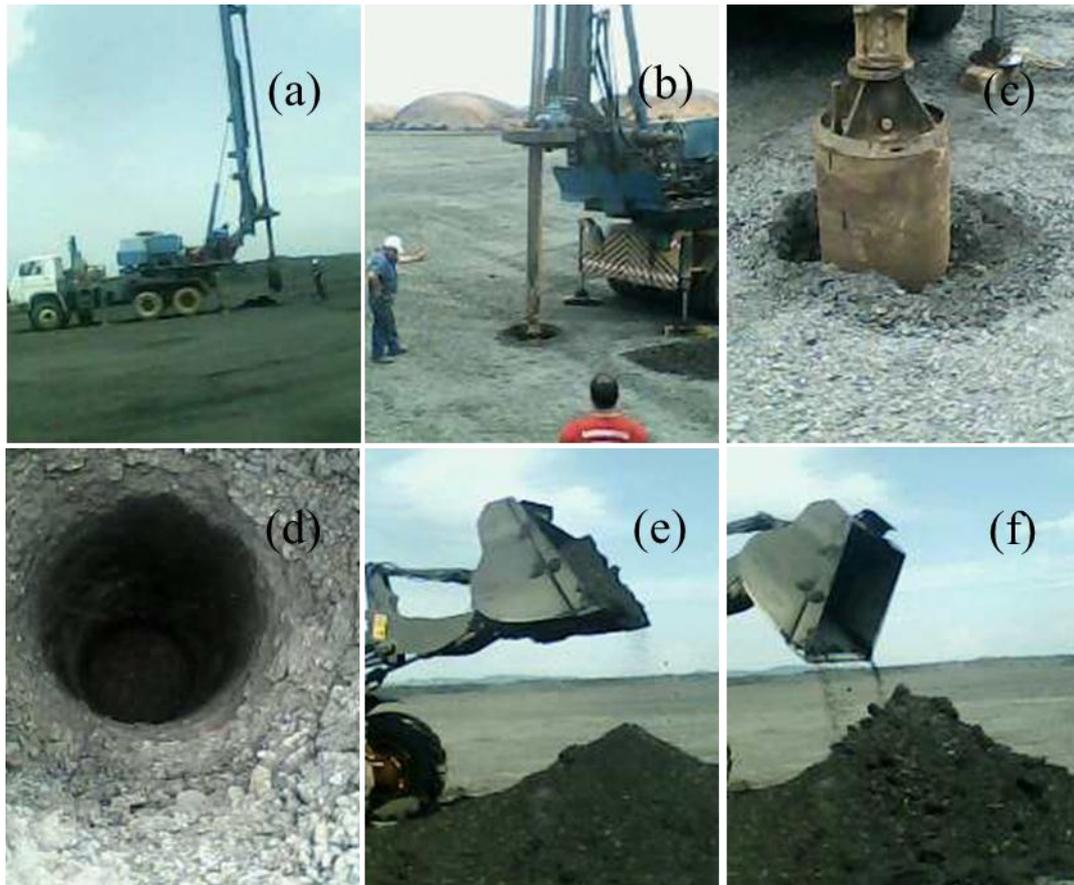


Figura 17: Detalhes da coleta da amostra do rejeito bruto.~

3.3 Caracterização granulométrica e densimétrica do rejeito

Uma amostra do material (40 kg) foi separada nas faixas granulométricas por peneiramento: grossos (- 50,8 mm + 2,0 mm), finos (- 2,0 mm + 0,5 mm) e lodo (- 0,5 mm). As frações grossas e finas foram submetidas a ensaios de meio denso, obtendo-se as seguintes faixas densimétricas: baixa (- 2,4), intermediária (entre 2,4 e 2,8) e alta (acima de 2,8). Cada fração foi analisada em relação ao teor de cinzas, umidade e composição elementar em termos de C, H, N e S.

3.4 Obtenção do Agregado Miúdo Reciclado (AMR)

O agregado miúdo reciclado foi obtido a partir das seguintes etapas: homogeneização e quarteamento do rejeito bruto, separação manual lodo-rejeito, ensaios de afunda-flutua e britagem.

3.4.1 Homogeneização e quarteamento

As amostras do rejeito bruto foram misturadas e quarteadas de acordo com a NBR 10.007 (ABNT, 2004). Praticamente todo o material (228 kg) foi utilizado para o beneficiamento com vista à obtenção do material de interesse. Somente uma pequena parcela (5 kg) foi separada para realização da análise elementar e dos ensaios estáticos e cinéticos.

3.4.2 Separação manual lodo-rejeito

Após o quarteamento, efetuou-se a separação da fração mais fina (abaixo de 0,5 mm). Primeiramente tentou-se separar apenas o lodo (< 0,1 mm) e utilizar o restante do material para produzir o agregado reciclado. Mas o material com granulometria entre 0,1 e 0,5 mm dificultou muito a separação manual e a separação densimétrica (meio denso). Sendo assim, optou-se por trabalhar apenas com o material com granulometria superior a 0,5 mm.

O processo de separação da fração inferior a 0,5 mm foi realizado por peneiramento a úmido com desagregação manual dos torrões. O lodo escoava juntamente com a água até um recipiente de coleta da mistura água-lodo. A utilização de água nesse processo resultou na geração de DAM. O pH do efluente gerado foi equalizado para precipitação dos metais dissolvidos antes de ser descartado.

3.4.3 Ensaios de afunda-flutua

Para a separação do material inerte, a técnica utilizada foi a separação por meios densos utilizando líquidos orgânicos, conforme NBR 8738 – Carvão Mineral – Ensaios Densimétricos (ABNT, 1985). As densidades de corte utilizadas foram 2,4 e 2,8 e foram obtidas através dos reagentes bromofórmio e xileno. O bromofórmio possui densidade 2,8 enquanto que o xileno possui densidade 0,86. A densidade de 2,4 foi obtida pela mistura do xileno com o bromofórmio. A densidade da mistura foi verificada com a utilização de um densímetro. A Tabela 16 apresenta os reagentes utilizados nos ensaios de separação densimétrica.

Tabela 16: Reagentes usados para o ensaio de afunda-flutua.

Nome	Tribromometano	Xileno
Sinônimo	Bromofórmio	Xilol
Fórmula molecular	CHBr_3	C_8H_{10}
Densidade	2,81	0,86
Frações de aplicação	1,7 - 2,8	1,5 - 2,4
Fornecedor	Vetec Química Fina	Vetec Química Fina

Após a preparação dos meios densos foram realizados os ensaios de afunda-flutua nos materiais grossos e finos separadamente. Para a realização destes ensaios foram utilizados os seguintes materiais: béquer (de polipropileno e de vidro), papel filtro, funil, escumadeira, bastão de vidro e balança com capacidade para 5 kg. O material foi imerso inicialmente no recipiente contendo o meio denso com densidade de 2,4. Um bastão de vidro foi usado para auxiliar na separação e liberar as partículas aderidas na parede do béquer. A fração que flutuou foi retirada com o auxílio de uma escumadeira da superfície do líquido, e despejada em um funil forrado com papel filtro. A seguir a parcela afundada era removida do recipiente seguindo a metodologia anterior. Ambas as frações (flutuadas e afundadas) foram secas à temperatura ambiente para evaporação do líquido orgânico. O meio denso é deixado escorrer em um papel filtro podendo ser reutilizado. O material afundado na densidade 2,4 foi mais uma vez imerso em novo recipiente contendo o líquido denso com densidade 2,8. O material flutuado foi removido como no procedimento anterior e seco. O afundado foi retirado do fundo do recipiente e posteriormente seco. A Figura 18 apresenta uma ilustração do processo de separação por meios densos.

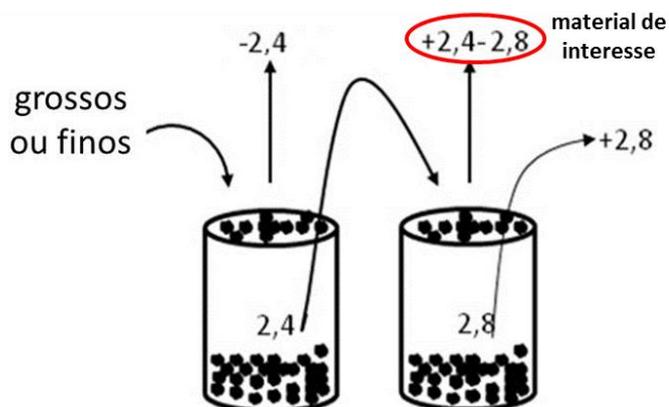


Figura 18: Procedimento experimental do ensaio afunda-flutua.

3.4.4 Ajuste granulométrico

Uma análise granulométrica do material com densidade intermediária foi realizada conforme NBR NM 248:2003 (ABNT, 2003). O material grosso e fino foi misturado e peneirado nas seguintes aberturas: 75 mm, 37,5 mm, 19 mm, 9,5 mm, 6,3 mm, 4,75 mm, 2,4 mm, 1,2 mm, 0,6 mm, 0,3 mm e 0,15 mm. O objetivo foi de verificar a distribuição granulométrica da fração com densidade entre 2,4 e 2,8.

A cominuição do material para a escala de agregado miúdo foi realizada por britagem em britador de mandíbulas seguido do britador de rolos. Esse procedimento foi empregado até a curva granulométrica do AMR ficasse entre os limites estabelecidos na NBR 7211 (ABNT, 2005).

3.5 Caracterização do Agregado Miúdo Reciclado (AMR)

A determinação da massa específica é de extrema importância para o cálculo de dosagem dos materiais na produção das misturas com diferentes teores de AMR. A massa específica é definida como a relação entre a massa e o volume de cheios, isto é, o volume de grãos dos agregados. A mesma foi verificada conforme procedimento descrito na NBR NM 52 (ABNT, 2003).

O ensaio para determinação da absorção de água do agregado foi realizado conforme NBR NM 30 (ABNT, 2001). Este ensaio consiste na secagem seguida de imersão em água de uma amostra do material. Após atingir a condição de saturado superfície seca, o cálculo é obtido através da fórmula:

$$A = \frac{ms - m}{m} \times 100$$

Onde:

m = massa do agregado após secagem;

ms = massa do agregado na condição saturado superfície seca.

Para a caracterização microestrutural, as amostras foram metalizadas com carbono e visualizadas no microscópio eletrônico de varredura MEV Jeol – JSM 5800 Scanning

Microscope do Centro de Microscopia Eletrônica da Universidade federal do Rio Grande do Sul.

As análises de FRX foram realizadas utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios X da marca Panalytical, modelo Minipal 4.

As análises de DRX foram realizadas utilizando um difratômetro de raios X da marca Siemens, modelo D5000.

A análise elementar foi realizada de duas formas. Os teores de C, H, N e S foram medidos em um equipamento marca Elementar modelo Vario Macro.

Outras análises foram realizadas pelo Laboratório de Solos da UFRGS. A análise de C orgânico foi realizada via combustão úmida (*Walkey Black*) e o N total (TKN) foi analisado pelo método Kjeldahl. Os parâmetros K, Ca, Na, K, Fe, Al, Mn, Cu, Zn, Pb, Cr, Ni, Co, Cd foram analisados via espectrometria de emissão óptica em plasma com acoplamento indutivo (ICP-OES) com abertura pelo método EPA 3050. Resultados expressos na amostra seca a 65°C e obtidos a partir da média aritmética de duas determinações.

Para a avaliação dos teores de cinzas e umidade, as amostras de AMR, foram cominuídas em um almofariz e peneiradas em uma peneira de diâmetro máximo de 0,25 mm (Tyler #60). A NBR 8289 – Carvão mineral – Determinação do teor de cinzas (ABNT, 1983) foi a norma utilizada. Aproximadamente 1 g de amostra, em um cadinho de porcelana, era pesada, em uma balança analítica, e colocada em forno-mufla frio. Após atingir a temperatura de 850°C, aguardava-se 1 hora. Na seqüência as amostras foram retiradas e colocadas em um dessecador. Depois de atingir a temperatura ambiente eram pesadas novamente para avaliar o teor de cinzas em base úmida.

Para a determinação do teor de cinzas base seca, os resultados eram corrigidos de acordo com o teor de umidade da amostra, medido pela secagem de 1 g de amostra, por 1 hora a 110°C até a estabilização do peso da amostra, conforme a norma NBR 8293 (ABNT, 1983b) – Carvão mineral – Determinação de umidade. O material utilizado para a determinação de umidade foi: placa de Petry, balança analítica, estufa e dessecador.

Para determinação do teor de matéria volátil houve a queima de 1g de rejeito de carvão, durante 5 minutos, em forno mufla a 950°C, de acordo com a norma NBR 8290 (ABNT, 1983). Todas as análises (umidade, cinzas e matéria volátil) foram realizadas em duplicata.

As formas de enxofre foram obtidas através das análises de enxofre total, realizada via instrumental, de enxofre sulfático e de enxofre pirítico. O enxofre total representa a soma do enxofre sulfático, do enxofre pirítico e do enxofre orgânico. O enxofre orgânico foi obtido pela diferença. A determinação do enxofre sulfático e do enxofre pirítico foi realizada de acordo com a *International Organization for Standardization* (ISO) norma 157:1996 (ISO, 1996). Todas as análises foram realizadas em duplicata.

Com o objetivo de classificar o AMR quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública foi realizada a caracterização e classificação conforme a NBR 10.004 (ABNT, 2004). Nesse sentido, foi avaliada a composição química do resíduo, a corrosividade, a reatividade, a inflamabilidade, a patogenicidade, a toxicidade bem como realização dos ensaios de lixiviação e solubilização. Essas análises foram realizadas em laboratório terceirizado.

Dos 100 kg de AMR obtidos para fabricação dos blocos através do beneficiamento do rejeito bruto, quarteou-se uma amostra de cerca de 2 kg para o peneiramento. O peneiramento na amostra quarteada foi realizado utilizando peneiras com as seguintes aberturas: 6,30 mm, 4,75 mm, 2,40 mm, 1,20 mm, 0,60 mm, 0,30 mm e 0,15 mm. O peneiramento foi realizado em triplicata.

3.6 Estudo da utilização do rejeito de carvão na fabricação de blocos de concreto para pavimentação

Após a obtenção do AMR e de sua caracterização, conduziu-se o estudo para avaliar o comportamento desse material quando empregado na fabricação de concreto. O estudo foi desenvolvido através do emprego do AMR em substituição ao agregado miúdo natural (areia média) na fabricação de blocos de concreto para pavimentação. As particularidades que envolvem a fabricação desse tipo de concreto são discutidas no item 2.4.

As etapas que constituem o estudo da utilização do AMR para fabricação de blocos de concreto para pavimentação são as seguintes: (1) planejamento experimental, (2) caracterização dos demais materiais utilizados, (3) estabelecimento do concreto referência, (4) fabricação de blocos de concreto para pavimentação com diferentes teores de AMR, (5) execução dos ensaios para avaliação das propriedades dos blocos fabricados, e (6) análise dos resultados.

3.6.1 Planejamento Experimental

A definição das variáveis a serem estudadas no programa experimental considerou as características que os blocos de concreto para pavimentação devem possuir para satisfazer as necessidades de mercado. Estas necessidades foram então transformadas em variáveis de resposta que podem ser analisadas estatisticamente.

Os blocos de concreto produzidos nessa pesquisa foram avaliados quanto às suas propriedades mecânicas (resistência à compressão e desgaste à abrasão) e físicas (absorção de água). Através desses ensaios é possível concluir sobre a viabilidade da aplicação do AMR obtido na fabricação de blocos de concreto para pavimentação nas condições estudadas. Sendo assim, as variáveis de resposta escolhidas para serem estudadas no programa experimental são:

- Resistência à compressão, expressa em MPa,
- Resistência à abrasão, expressa pelo índice de desgaste por abrasão (em mm), e
- Absorção, expressa através da taxa de absorção de água (em porcentagem).

As principais características requeridas para esse tipo de produto estão relacionadas com as solicitações de serviço (trânsito de veículos e pedestres), que submetem o pavimento a esforços, tanto no sentido de comprimi-los quanto de causar o desgaste superficial das peças. A absorção de água pode causar o surgimento de eflorescências que prejudicam o aspecto visual e diminuem a vida útil do pavimento do ponto de vista estético. Assim sendo, considerou-se pertinente avaliar tais variáveis de resposta nos blocos produzidos. A NBR 9781 (ABNT, 1987) fixa as condições exigíveis

para a aceitação de peças de concreto destinadas à pavimentação e estipula que o limite inferior para a resistência à compressão para tais produtos seja 35 MPa. Já para a resistência à abrasão, expressa pelo índice de desgaste por abrasão, não há limite estipulado em norma. Deseja-se o menor índice de desgaste por abrasão. O mesmo ocorre para absorção de água.

Quando se trata com materiais de construção, os experimentos quase sempre envolvem muitos fatores. Assim, é necessário estudar o efeito interligado desses fatores ou variáveis sobre a resposta do experimento (Dal Molin et al, 2005). Esse fato motivou a priorização dos fatores controláveis a serem estudados. Para tal, foram elencados todos os fatores controláveis que podem exercer influência sobre o resultado das variáveis de resposta. Cada um foi pontuado de acordo com sua importância relativa para cada variável de resposta, considerando os intervalos de pesquisa, descritos na Tabela 17. A determinação da importância de cada um permite a elaboração de uma matriz onde a intensidade de cada parâmetro do processo sobre as variáveis de resposta são mensuradas, possibilitando a priorização dos parâmetros de processo através da seguinte fórmula:

$$PR(x_j) = \left(\sum_i R_{ij} \times IE_i \right) / \left(\sum_i IE_i \right)$$

onde:

$PR(x_j)$ = índice de priorização;

R_{ij} = relação entre a variável de resposta i e o parâmetro do processo j ;

IE_i = índice de importância relativa para a variável de resposta i .

Os parâmetros do processo com os maiores índices de priorização foram eleitos como fatores controláveis e os demais foram mantidos constantes durante o experimento. A pontuação de cada parâmetro é atribuída de acordo com a intensidade do efeito que o parâmetro exerce sobre a variável de resposta. As pontuações de cada parâmetro foram baseadas em informações obtidas através de pesquisa bibliográfica e opinião de especialistas da área. A Tabela 17 apresenta os índices de priorização de cada fator, conforme metodologia estabelecida, e seus respectivos níveis avaliados.

Tabela 17: Índices de priorização dos fatores controláveis.

Parâmetros	Intervalo de pesquisa		PR(x _j)	Níveis adotados no estudo
	Min.	Máx.		
% de substituição	0%	100%	7,69	0, 25, 50, 75 e 100 %
idade de cura	7 dias	90 dias	7,03	7, 28 e 90 dias
relação água/cimento	variável	variável	6,94	variável
tipo de cimento	Tipo A	Tipo B	1,00	constante
tipo de brita	Tipo A	Tipo B	1,00	constante
tipo de areia	Tipo A	Tipo B	1,00	constante
tipo de betoneira	Tipo A	Tipo B	0,81	constante
operador	A	B	0,94	constante

Após análise dos resultados obtidos na Tabela 17, optou-se por controlar os parâmetros porcentagem de substituição e idade de cura. A relação água/cimento não foi considerada um fator constante e nem controlável devido à diferença de absorção de água entre a areia média natural e o AMR. Para cada moldagem buscou-se a relação água/cimento ideal (maior umidade possível de compactação sem a perda de forma dos blocos), objetivando a maior resistência e o melhor acabamento possíveis. Conseqüentemente, a influência desse fator sobre as variáveis de resposta não pôde ser verificada.

Conforme Markus (1973), na experimentação, são freqüentes as situações nas quais, em vez de dois, são vários os produtos ou processos que competem entre si. O problema consiste então na comparação de mais de duas médias. Nestes casos a técnica indicada é a análise de variância (ANOVA). A análise estatística ANOVA compara a variabilidade dentro de cada grupo estudado com a variabilidade entre esses grupos, de forma a identificar com apenas um teste estatístico a existência de alguma diferença significativa entre pelo menos um dos grupos em relação aos demais, necessitando de um segundo teste estatístico para identificar especificamente quais os grupos que apresentam essa diferença.

O fator intervalo de substituição do agregado miúdo natural por agregado de rejeitos de carvão, compreendido entre 0 e 100%, permite avaliar as variáveis de resposta em uma condição ampla, já que não há nenhuma informação sobre o comportamento desse material quando utilizado como agregado miúdo para produção

de concreto. O fator tempo de cura variou para cada tipo de ensaio. A resistência à compressão foi verificada nas três idades de cura estabelecidas (7, 28 e 90 dias). Já a resistência à abrasão foi verificada apenas aos 28 e 90 dias de cura, enquanto a absorção de água foi verificada apenas aos 28 dias de cura.

Além desses dois fatores, foi avaliado também o fator data da moldagem na avaliação da resistência à compressão. No caso de experimentos envolvendo a produção de concreto em locais onde as condições climáticas não são controladas, são considerados fatores de ruído parâmetros meteorológicos como a temperatura e umidade do ar. Não é possível executar todo o programa experimental do presente estudo em apenas um só dia. Mesmo que fosse possível, ainda assim esses dois parâmetros poderiam interferir nos resultados caso suas variações fossem significativas no mesmo dia, o que é muito comum ocorrer. Para minimizar a influência dos fatores de ruído sobre os resultados, deve-se tornar o desempenho do sistema pouco sensível ao efeito dos mesmos. Por essa razão, e para avaliar se os fatores de ruído influenciam nos resultados especificamente desse experimento, efetuou-se a randomização da ordem de execução do experimento (moldagem dos corpos-de-prova) e o fator data de moldagem foi incluído na ANOVA. Para que isso fosse possível, foi necessário moldar cada traço de substituição em dois dias ao invés de moldar em um só dia, e considerar a data de moldagem como mais um fator controlável. A Figura 19 apresenta a ordem de execução das datas em que ocorreu a moldagem dos blocos no programa experimental, o número de corpos-de-prova produzidos em cada data de moldagem e o tempo de cura no qual o corpo-de-prova foi submetido aos ensaios estabelecidos (variáveis de resposta). Os círculos representam os corpos-de-prova e as diferentes datas são representadas pelos diferentes tons de cinza.

			ordem de execução				
			1°	3°	5°	4°	2°
ic = idade de cura			<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>
dm 1 = data da moldagem 1			7°	9°	10°	8°	6°
dm 2 = data da moldagem 2			<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>

			resistência à compressão				
			% de substituição				
			0%	25%	50%	75%	100%
ic	7	dm 1	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>
			<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>
		dm 2	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>
			<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>
	28	dm 1	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>
			<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>
		dm 2	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>
			<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>
	90	dm 1	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>
			<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>
		dm 2	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>
			<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>

			resistência à abrasão				
			% de substituição				
			0%	25%	50%	75%	100%
ic	28	dm 1	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>
		dm 2	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>
	90	dm 1	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>
		dm 2	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>

			absorção de água				
			% de substituição				
			0%	25%	50%	75%	100%
ic	28	dm 1	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>
		dm 2	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>

Figura 19: Ordem de execução das datas em que os blocos de concreto para pavimentação foram moldados.

Através da Figura 19, pode-se notar que para cada traço de substituição moldado em cada data de moldagem (10 datas), foram produzidos 12 corpos-de-prova, totalizando 24 corpos-de-prova (2 datas de moldagem) de cada traço para execução dos três ensaios (18 blocos para resistência à compressão, 4 blocos para resistência à abrasão e 2 para absorção de água). O número total de blocos produzidos em todo o programa experimental foi 120 blocos.

Através da ANOVA efetuada com três fatores controláveis (% de substituição, idade de cura do concreto e data da moldagem) para os dados obtidos nos ensaios de

resistência à compressão verificou-se que o fator data da moldagem não é significativo, assim como as interações data de moldagem*% de substituição e data de moldagem*idade de cura. Esse fato motivou a efetuar a ANOVA com apenas os fatores % de substituição e idade de cura, o que permite utilizar 6 repetições ao invés de apenas 3 para a variável resistência à compressão. A realização do experimento com repetição é necessário, já que as interações entre os fatores principais são importantes e, nesse caso não podem ser utilizadas para formar o termo do erro. Já para os ensaios de desgaste à abrasão e absorção de água foram moldados dois corpos-de-prova por idade (duas repetições), sendo essas variáveis de resposta também avaliadas através da ANOVA. Em todos os casos foi utilizado um nível de significância de 95%. A ANOVA foi realizada através do programa Microsoft Excel. A Tabela 18 apresenta um resumo do programa experimental utilizado no presente estudo.

Tabela 18: Resumo do programa experimental.

% substituição	Variável de resposta	Idade	n° cp's (repetições)
0%	Resistência a compressão	7	6
		28	6
		90	6
	Resistência a abrasão	28	2
		90	2
	Absorção por imersão	28	2
25%	Resistência a compressão	7	6
		28	6
		90	6
	Resistência a abrasão	28	2
		90	2
	Absorção por imersão	28	2
50%	Resistência a compressão	7	6
		28	6
		90	6
	Resistência a abrasão	28	2
		90	2
	Absorção por imersão	28	2
75%	Resistência a compressão	7	6
		28	6
		90	6
	Resistência a abrasão	28	2
		90	2
	Absorção por imersão	28	2
100%	Resistência a compressão	7	6
		28	6
		90	6
	Resistência a abrasão	28	2
		90	2
	Absorção por imersão	28	2

O traço e o tipo de maquinário utilizados são de suma importância para obtenção de resistência mecânica satisfatória. Considerando que o objetivo do trabalho não é estabelecer a condição ideal para fabricação de blocos e sim comparar os resultados obtidos com os dos blocos referência (0% de substituição) optou-se por não estudar outros fatores controláveis como a presença de aditivos ou utilização de maquinário mais eficiente. Devido a esse fato, não foi possível realizar o fracionamento do experimento, já que o experimento utiliza apenas dois fatores controláveis.

3.6.2 Produção dos blocos de concreto

3.6.2.1 Materiais utilizados

Além do AMR obtido no beneficiamento do rejeito bruto, os blocos de concreto foram produzidos utilizando agregados naturais, cimento e água. A caracterização dos materiais utilizados é apresentada nos itens a seguir.

3.6.2.1.1 Cimento

O cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP-V-ARI-RS) tem a capacidade de atingir altas resistências já nos primeiros dias da aplicação em decorrência de sua hidratação mais rápida. De acordo com Galvão (2003), o desenvolvimento da alta resistência inicial é conseguido pela maior proporção de C₃S (Silicato tricálcico) e por uma moagem mais fina do clínquer do cimento. Joukoski (2003) afirma que esse tipo de cimento não deve ser usado em concreto massa ou em peças estruturais com grandes dimensões, já que a alta resistência inicial implica em grande despreendimento de calor de hidratação.

A opção de utilizar o cimento CP-V-ARI-RS levou em consideração, além da propriedade de atingir altas resistências nos primeiros dias de aplicação, a sua disponibilidade no mercado e por ser o mais puro (livre de adições).

O uso de cimentos de alta resistência inicial é particularmente interessante em pré-moldados de concreto. Isto porque é uma característica desejável que tais elementos adquiram resistências mais elevadas em baixas idades, uma vez que os tempos de desforma e cura são mais abreviados do que, por exemplo, concretos estruturais convencionais (Pagnussat, 2004). A Tabela 19 apresenta as principais características do cimento CP-V-ARI-RS utilizado para confecção dos blocos. As informações foram fornecidas pelo fabricante.

Tabela 19: Características do cimento CP-V-ARI-RS utilizado.

Característica	% média
perda ao fogo	3,18
SiO ₃	25,12
Al ₂ O ₃	7,31
Fe ₂ O ₃	3,47
CaO	53,21
MgO	6,12
K ₂ O	1,47
Na ₂ O	0,05
SO ₃	2,59
Resíduo insolúvel	12,47
CO ₂	2,38

3.6.2.1.2 Agregado miúdo natural

Como agregado miúdo foi utilizado dois tipos de areia: média e fina. A areia fina foi necessária para dar um bom acabamento aos blocos. A areia média empregada é de origem quartzosa, proveniente do Rio Jacuí/RS, enquanto que a areia fina utilizada é de origem calcária. Ambas foram secas antes de serem utilizadas. A Tabela 20 e Tabela 21 apresentam a caracterização das areias média e fina utilizadas. A Figura 20 apresenta a curva granulométrica da areia média natural em comparação aos limites estabelecidos na NBR 7211 (ABNT, 2005). Os dados foram fornecidos pelo Núcleo Orientado para Inovação da Edificação (NORIE) da UFRGS.

Tabela 20: Caracterização física da areia média utilizada.

Módulo de finura	2,21
dimensão máxima (mm)	2,36
Massa específica (g/cm ³)	2,62
Massa unitária (g/cm ³)	1,57

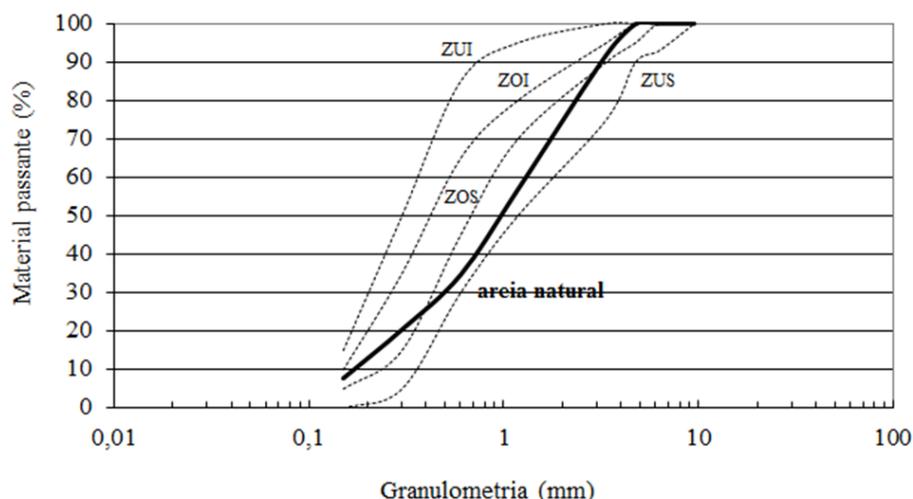


Figura 20: Curva granulométrica da areia média natural e os limites estabelecidos na NBR 7211 (ZUI – limite inferior, zona utilizável; ZOI – limite inferior, zona ótima; ZOS – limite superior, zona ótima; ZUS – limite superior, zona utilizável).

Tabela 21: Distribuição granulométrica da areia fina.

Abertura (mm)	% retida	% acumulada
4,8	0,0	0,0
2,4	0,0	0,0
1,2	0,1	0,1
0,6	0,4	0,5
0,3	7,5	8,0
0,15	60,5	68,6
< 0,15	31,4	100,0

3.6.2.1.3 Agregado graúdo natural

O agregado graúdo utilizado foi a brita zero, classificada dessa forma através da NBR 7211 (ABNT, 2005), também é conhecida popularmente como pedrisco. A brita zero empregada na fabricação dos blocos é de origem granítica. A Tabela 22 apresenta o resultado dos ensaios de caracterização da brita zero utilizada. Os dados foram fornecidos pelo Núcleo Orientado para Inovação da Edificação (NORIE) da UFRGS.

Tabela 22: Distribuição granulométrica e caracterização física da brita zero utilizada.

Abertura das peneiras (mm)	Amostras		NBR 7211 (ABNT, 2005)			
	Massa retida (%)	Massa retida acumulada (%)	Retida acumulada (% em massa)			
			Zona granulométrica d/D ^a			
			4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50
19	-	-	-	2-15 ^b	65 ^b -95	95-100
9,5	1	1	2-15 ^b	80 ^b -100	95-100	-
4,75	81	82	80 ^b -100	95-100	-	-
2,36	17	99	95-100	-	-	-
1,18	1	100	-	-	-	-
0,6	0	100	-	-	-	-
0,3	0	100	-	-	-	-
0,15	0	100	-	-	-	-
Módulo de finura		5,82	a - Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo.			
dimensão máxima (mm)		9,5				
Massa específica (g/cm ³)		2,98	b - Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no			

3.6.2.1.4 Água

A água utilizada na fabricação dos blocos foi a disponível para abastecimento local, fornecida pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto de Porto Alegre (DMAE).

3.6.2.1.5 AMR

A caracterização do AMR é apresentada no item 4.2.

3.6.2.2 Moldagem dos blocos

A moldagem dos blocos foi realizada no laboratório de materiais do NORIE/UFRGS. O concreto foi produzido em uma betoneira de eixo vertical, ilustrada na Figura 21. Os blocos foram produzidos em uma vibro-prensa modelo PMB-10 Vibramaq, com vibração horizontal, sendo realizada por um eixo excêntrico movimentado por um motor de 3 hp trifásico. A capacidade de produção da máquina é de seis blocos por ciclo. A vibro-prensa é ilustrada na Figura 22.



Figura 21: Betoneira de eixo vertical utilizada na produção do concreto.



Figura 22: Visão lateral da vibro-prensa e detalhe dos moldes.

3.6.2.2.1 Métodos

Visando minimizar alterações nos resultados devido ao fator humano, foi adotada uma mesma metodologia para produção do concreto e dos blocos.

Para produção do concreto, a primeira etapa do processo correspondeu à pesagem dos materiais secos. A betoneira foi abastecida primeiramente com a brita e parte da água, depois com o cimento, com os agregados miúdos e com o restante da água. Conforme Pagnussat (2004) e Hood (2006), essa ordem é importante para remover o material fino aderido à brita, que é lavada com a água. Isso faz com que a brita seja envolvida por uma pasta de cimento antes da presença do agregado miúdo.

Conforme apresentado no item 2.4, os blocos de concreto para pavimentação são produzidos a partir de concretos secos, ou seja, com uma baixa relação água/cimento. A quantidade de água deve ser suficiente para que haja uma boa hidratação do cimento ao mesmo tempo em que não seja prejudicial à resistência à compressão, o que ocorre quando a água é adicionada em excesso. O método denominado “ponto de pelota” é um procedimento utilizado para verificar a umidade ótima, que corresponde à máxima quantidade de água possível presente na mistura. Alguns autores utilizaram esse método para determinação da umidade ótima na fabricação de concretos secos (Pagnussat, 2004; Hood, 2006; Tango, 1994; Vargas, 2002), no entanto essa é uma técnica bastante empírica e exige que o operador possua certa experiência para sua utilização. O método deve ser realizado durante a mistura do concreto e consiste em moldar uma pelota de concreto na palma das mãos sem que esta se desmanche (falta de água) ou suje excessivamente as mãos (excesso de água). Essa foi a metodologia escolhida para determinar a quantidade de água nos concretos produzidos, tanto na etapa de determinação do traço referência quanto na fabricação dos blocos utilizados para realização dos ensaios propostos no programa experimental. Conforme Hood (2006), as etapas para mistura dos materiais foram as seguintes:

- a) Colocar a água até a relação a/c 0,30;
- b) Verificar o ponto de pelota;
- c) Adicionar água de acordo com o observado na análise anterior;
- d) Aguardar 30 segundos para homogeneizar a mistura;
- e) Verificar o ponto de pelota;
- f) Se não for verificado o ponto de pelota, repetir o processo até verificá-lo.

Após a verificação do ponto de pelota, o concreto no estado fresco é levado até a máquina de vibro-prensagem, onde um suporte de madeira fica previamente posicionado abaixo dos moldes. O concreto foi, então, disposto nos moldes após a aplicação do desmoldante nos mesmos. Após o preenchimento dos moldes com concreto fresco, iniciava-se a vibração e compactação simultâneas do concreto, processo que durava 30 segundos por ciclo. O desmoldante é utilizado para facilitar a desforma dos blocos. Durante a desforma, os extratores, responsáveis pela compactação dos

blocos, permanecem imóveis enquanto o molde ascende, permitido que os blocos permaneçam sobre o suporte de madeira onde foram moldados. A cura foi realizada à temperatura ambiente e os blocos foram protegidos das intempéries.

3.6.2.2.2 Dosagem do concreto referência

Ainda que não seja objetivo do presente estudo estabelecer a dosagem para os blocos de pavimentação produzidos durante o programa experimental, a mesma se faz necessária, já que os blocos produzidos com AMR devem ser comparados com os blocos referência (sem AMR na composição). Os blocos referência devem apresentar bom acabamento e resistência à compressão mínima para que possam ser empregados para pavimentação.

A norma que rege a qualidade dos blocos de pavimentação no Brasil é a NBR 9781 (ABNT, 1987). Nela são estabelecidas duas faixas de resistência à compressão (35 e 50 MPa) que variam conforme o tipo e a intensidade de tráfego ao qual o pavimento é submetido.

A qualidade dos blocos produzidos está diretamente relacionada com o equipamento e matérias-primas utilizados para sua confecção. Máquinas de pequeno porte como a disponível no laboratório NORIE/UFRGS possui menor capacidade de compactação, resultando em blocos com resistências inferiores quando comparados a blocos fabricados em máquinas com maior capacidade de prensagem, para um mesmo traço de concreto. Esse fato foi constatado por Pagnussat (2004) ao empregar o traço utilizado por uma empresa da região metropolitana de Porto Alegre na fabricação de blocos com a vibro-prensa utilizada no presente estudo. A empresa utiliza máquinas com maior poder de compactação do que a máquina disponível no laboratório NORIE/UFRGS. Os blocos produzidos apresentaram resistências da ordem de 14 MPa e aspecto visual insatisfatório, sendo verificado a necessidade de utilização de areia fina para o acabamento.

O presente estudo buscou estabelecer um traço que atendesse à norma nacional (35 MPa) e que apresentasse bom acabamento. O primeiro traço a ser utilizado foi o mesmo utilizado por Hood (2006), apresentado na Tabela 23.

Tabela 23: Primeiro traço, em massa, utilizado na determinação do traço referência.

traço	cimento	areia média	areia fina	pedrisco	a/c	(α)	média (MPa)
1	1	2,67	0,67	1,16	0,37	0,79	21,70

Os blocos produzidos apresentaram bom acabamento, porém excesso de agregados miúdos, o que resultou em baixa resistência à compressão. A partir desse, outro traço foi utilizado, onde as quantidades de cimento e de agregado graúdo foram aumentadas. O teor de argamassa (α) foi levemente reduzido, buscando um acabamento ainda melhor. O segundo traço apresentou bom acabamento e resistência à compressão média satisfatória. Dessa forma utilizou-se o segundo traço para confecção dos blocos com AMR. O segundo traço é apresentado na Tabela 24. Os blocos produzidos com o segundo traço (estados fresco e endurecido) são apresentados na Figura 23. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados aos 28 dias de cura.

Tabela 24: Segundo traço, em massa, utilizado como traço referência.

traço	cimento	areia média	areia fina	pedrisco	a/c	(α)	média (MPa)
2	1	1,71	0,93	1,17	0,35	0,76	36,74



Figura 23: Blocos de concreto obtidos com o segundo traço utilizado (estado fresco e endurecido).

3.6.2.2.3 Confeção dos blocos de concreto para análise comparativa

A confeção dos blocos de concreto necessários à análise da viabilidade técnica de utilização do AMR em substituição ao agregado miúdo natural teve como ponto de partida a produção dos blocos referência (0% de substituição).

Para a confeção dos blocos de concreto com os diferentes teores de substituição da areia média natural por AMR, a massa específica da areia e do AMR foram consideradas. A substituição parcial foi realizada em volume, de modo a manter as mesmas condições de concretagem para um mesmo volume de concreto. Este procedimento se faz necessário devido as diferenças entre as massa específicas do agregado miúdo natural e do AMR. A substituição em massa da areia pelo AMR alteraria o traço estabelecido. Desse modo, o cálculo da massa equivalente ao percentual de areia média substituída por AMR foi dado pela fórmula:

$$m_{amr} = \left(\frac{\gamma_{amr}}{\gamma_a} \right) \times m_a \times \%substituição$$

Onde:

m_{amr} = massa de AMR (em kg), correspondente à percentagem de substituição sobre o volume de cimento;

$(\gamma_{amr} / \gamma_a)$ = relação entre as massas específicas (em kg/dm³) de AMR e de areia média natural;

m_a = massa de areia média natural (em kg);

$\%substituição$ = teor de substituição de areia média natural por AMR (0, 25, 50, 75 ou 100%).

A relação água/cimento não pôde ser mantida para todas as percentagens de substituição em virtude que o AMR apresenta maior absorção de água do que a areia média natural. Sendo assim, quanto maior a percentagem de substituição de areia média natural por AMR, maior a relação água/cimento. A Tabela 25 apresenta as relações

água/cimento utilizadas para cada porcentagem de substituição baseadas no teste da pelota.

Tabela 25: Relação água/cimento utilizada em cada porcentagem de substituição.

% de substituição	relação água/cimento
0%	0,35
25%	0,37
50%	0,39
75%	0,43
100%	0,44

A Figura 24 apresenta os blocos produzidos durante o programa experimental.

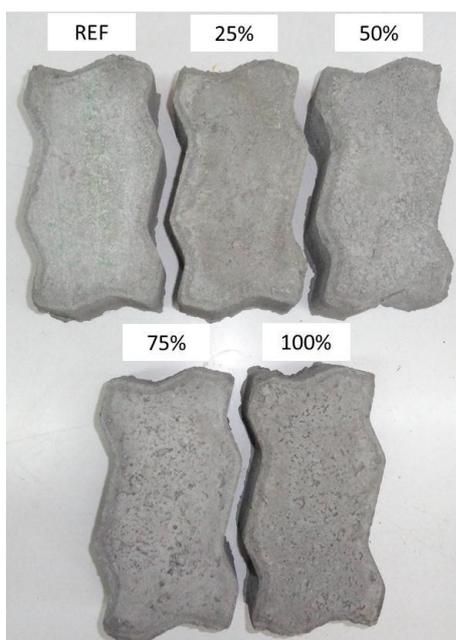


Figura 24: Blocos com 0, 25, 50, 75 e 100% de substituição do agregado miúdo natural por AMR.

3.6.2.3 Ensaios realizados

A seguir é apresentada a metodologia utilizada para execução dos ensaios propostos para verificação das propriedades dos blocos de concreto produzidos. Os ensaios de resistência à compressão e de resistência à abrasão foram realizados na Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul (CIENTEC) enquanto que os ensaios de absorção de água foram realizados no LEAMet na UFRGS.

3.6.2.3.1 Resistência à compressão

O procedimento de ensaio seguiu as recomendações propostas pela NBR 9780 (ABNT, 1987). Os blocos foram capeados com argamassa de cimento e areia fina, em um traço de 1:1. Após 25 horas de cura do capeamento, as peças eram imersas em água por 24 horas, de modo a ficarem saturadas de água no momento do ensaio.

Os blocos foram rompidos em uma prensa hidráulica da marca EMIC, modelo PC 120, com capacidade de 120.000 kgf. Os corpos-de-prova foram dispostos entre placas metálicas auxiliares de 90 mm de diâmetro. Um gabarito de madeira foi utilizado para garantir o posicionamento correto dos blocos junto ao equipamento. A velocidade de carregamento dos corpos-de-prova foi de 593 kPa/s (0,6 MPa), até a ruptura dos blocos. A Figura 25 apresenta detalhes do ensaio de resistência à compressão realizado com os blocos produzidos.



Figura 25: Detalhes do ensaio de resistência à compressão.

3.6.2.3.2 Resistência à abrasão

A Fundação de Ciência e Tecnologia (CIENITEC) desenvolveu uma metodologia própria para a determinação do desgaste por abrasão em concreto, uma vez que não há norma brasileira avaliação dessa propriedade dos blocos. O “método CIENITEC” de desgaste por abrasão simula um percurso de 500 metros percorridos por um corpo-de-prova submetido a uma pressão constante de 0,06 MPa sobre pó abrasivo carborundo. De cada bloco são extraídas duas amostras através de corte com serra diamantada. O resultado é apresentado em termos de índice de desgaste. Este equivale à média das

diferenças entre as alturas iniciais e finais de cinco pontos no corpo-de-prova. A Figura 26 apresenta o equipamento utilizado na execução do ensaio.



Figura 26: Equipamento utilizado no ensaio de resistência à abrasão.

3.6.2.3.3 Absorção de água

Embora não existam normas nacionais específicas para determinação da absorção de água para blocos de concreto para pavimentação, para realização do ensaio de absorção foi utilizado o proposto pela NBR 12118 (ABNT, 2001), que determina procedimentos para verificação da absorção de água para blocos de concreto para alvenaria. O ensaio consiste em secar os blocos em estufa, a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, até a constância de massa. Após esta etapa, os mesmos são resfriados até a temperatura ambiente e imediatamente imersos em água, onde leituras são realizadas após 24 horas e depois de 2 em 2 horas, ou até que não se registre diferença de massa superior a 0,5% entre duas leituras consecutivas. O valor da absorção de água considera a massa do bloco saturado de água e após seco em estufa, sendo calculado pela fórmula:

$$a\% = 100 \times \frac{(m2 - m1)}{m1}$$

Onde,

$a\%$ = absorção de água;

$m1$ = massa do bloco após secagem em estufa;

$m2$ = massa do bloco saturado com água.

3.7 Avaliação do potencial de geração de acidez

A metodologia para avaliação do potencial de geração de acidez do rejeito bruto, do AMR e dos blocos consistiu nas seguintes etapas: ensaios de contabilização de ácidos e bases, ensaios cinéticos em células úmidas e análises químicas dos lixiviados das células úmidas. Essa etapa do trabalho foi executada no Laboratório de Estudos Ambientais para Metalurgia (LEAMet) na UFRGS.

3.7.1 Ensaios estáticos de contabilização de ácidos e bases

Os ensaios estáticos foram realizados pelo método tradicional de contabilização de ácidos e bases (ABA). O objetivo foi determinar o balanço entre a produção de acidez (AP) e consumo de acidez – neutralização (NP), pelos componentes minerais da amostra (Sobek et al, 1978; EPA, 1994).

Pelo método ABA a determinação do potencial de acidez (AP) foi realizada a partir da análise de enxofre total, realizada via instrumental no equipamento da marca Elementar modelo Vario Macro. O cálculo foi realizado pela seguinte equação:

$$AP = \left(\frac{1000}{32} \right) \times \% S_{total}$$

Para a determinação do potencial de neutralização (NP), inicialmente procedeu-se um teste *fizz*, que teve por finalidade definir o volume e a concentração (normalidade) de ácido clorídrico empregado na análise. O desenvolvimento deste teste é o seguinte: duas gotas de HCl 25 % é adicionado em 0,5 g de amostra. O objetivo da adição do ácido é verificar a presença de carbonatos na amostra, o qual pode ser reconhecido pelo borbulhamento ou pelo som efervescente. Dependendo da intensidade do som, as amostras foram padronizadas segundo a Tabela 26.

Tabela 26: Volume e normalidade de HCl a ser adicionado na determinação do NP (Sobek et al., 1978).

Teste fizz	HCl (mL)	HCl (N)
Nenhum	20	0,1
Fraco	40	0,1
Moderado	40	0,5
Forte	80	0,5

Conhecido o volume e a normalidade do HCl, mediu-se o potencial de neutralização. O procedimento consistiu em submeter 2 g de amostra a uma solução ácida (com o volume e normalidade (N) determinados pelo teste *fizz*) e aquecer a 90°C para consumir os minerais neutralizantes. Após, titulou-se a solução ácida com NaOH (com a mesma normalidade do ácido) até pH 7. O potencial de neutralização, em kg CaCO₃/t de amostra, foi calculado com as seguintes equações:

$$C = \frac{mlHCl(PB)}{mlNaOH(PB)}$$

$$Eq. \text{ác. consumido} = (ml \text{ác. ad.}) - (ml \text{base ad.}) \times C$$

$$NP = (Eq. \text{ác. consumido}) \times 25,0 \times (N\text{ácido})$$

Onde:

C = constante;

PB = prova em branco;

N = normalidade;

ad.= adicionado.

Todos os ensaios ABA foram realizados em duplicata. Os dados obtidos permitiram também calcular os seguintes índices:

$$NNP = NP - AP$$

$$NPR = NP/AP$$

Os critérios ABA para identificação do potencial de geração de acidez dos materiais são (NNP e NPR):

- valores de NNP menores que - 20 indicam que haverá a formação de ácido;
- valores de NNP maiores que + 20 indicam que não haverá a formação de ácido;
- valores de NNP entre -20 e + 20 indicam que é difícil prever a formação ou não de ácido;

- valores do NPR menores 1:1 indicam a provável geração de DAM;
- valores de NPR entre 1:1 e 2:1 indicam a possível geração de DAM;
- valores de NPR entre 2:1 e 4:1 indicam que a DAM não é esperada;
- valores de NPR maiores que 4:1 indicam que não será gerada a DAM.

Todas as análises foram realizadas em duplicata.

3.7.2 Ensaios cinéticos em células úmidas

Os ensaios cinéticos foram realizados pelo método de células úmidas – *Humidity Cell Test*, conforme procedimento D 5744 (ASTM, 1996). O teste consistiu em colocar uma amostra de aproximadamente 500 gramas com granulometria entre 6,3 mm e 0,5 mm em uma célula. O ciclo foi efetuado pela exposição das amostras por três dias ao ar seco, três dias ao ar úmido e um dia para lavagem em água (500 mL). No momento da realização da lavagem da célula, o dreno para coleta do lixiviado localizado na parte inferior da célula foi fechado antes de colocar a água de lavagem. Dessa forma se impediu que a água criasse caminhos preferenciais entre o material, o que poderia interferir nos resultados, já que dessa forma apenas uma parcela do material seria lixiviado. Após a lavagem, o lixiviado foi coletado e analisado. O período de teste aplicado foi de 20 semanas. A Figura 27 apresenta o equipamento utilizado nos ensaios cinéticos e a Figura 28 apresenta detalhes dos materiais submetidos ao ensaio.



Figura 27: Células úmidas utilizadas para realização dos ensaios cinéticos de previsão da drenagem ácida de mina.

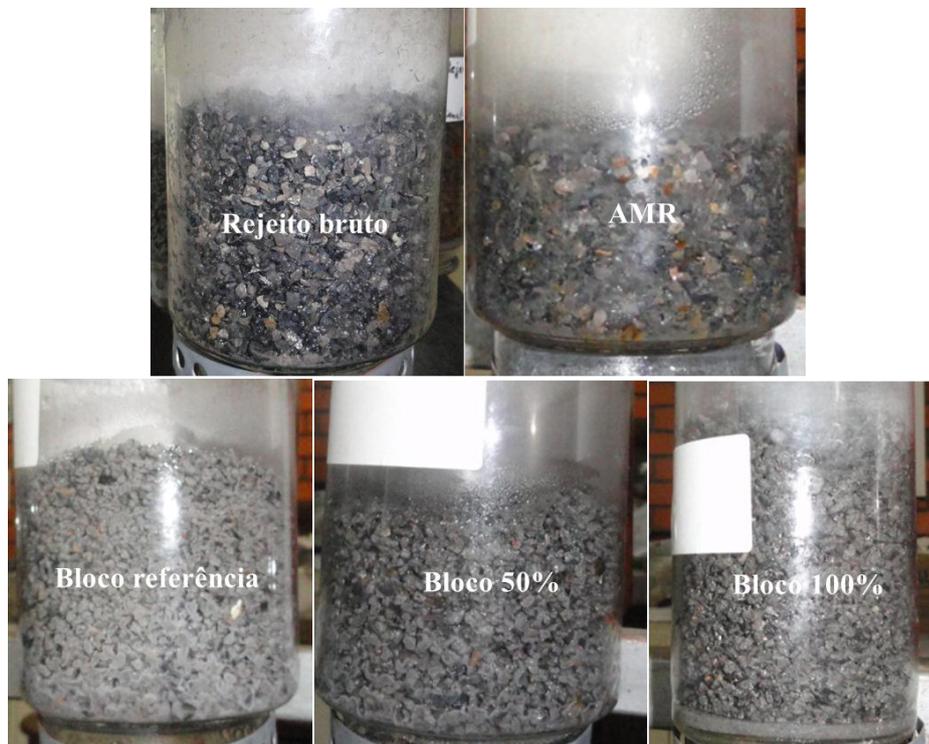


Figura 28: Detalhes dos materiais submetidos ao ensaio.

A quantidade de cada material disposta em cada célula foi de 500 g. Os lixiviados das células úmidas foram analisados em relação aos seguintes parâmetros de qualidade de água: pH, potencial redox, acidez, alcalinidade total, alumínio, ferro, manganês, zinco, cálcio e sulfato. As análises foram realizadas semanalmente, seguindo os procedimentos do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005). Os equipamentos utilizados e seus limites de detecção encontram-se de forma simplificada na Tabela 27.

Tabela 27: Métodos de análise, equipamentos e limites de detecção dos parâmetros analisados nos lixiviados das células úmidas.

Análise	Método	Equipamento	Limite
pH	potenciométrico	pH digital Digimed	0,1
Acidez	titulométrico	bureta manual	1,0 mg/L CaCO ₃
Alcalinidade parcial	titulométrico	bureta manual	1,0 mg/L CaCO ₃
Alcalinidade total	titulométrico	bureta manual	1,0 mg/L CaCO ₃
Potencial redox	potenciométrico	pH digital Digimed com eletrodo de Eh	0,1 mV
Alumínio	absorção atômica	Varian FS 240	0,002 µg/ml
Ferro	absorção atômica	Varian FS 240	0,005 µg/ml
Manganês	absorção atômica	Varian FS 240	0,003 µg/ml
Zinco	absorção atômica	Varian FS 240	0,002 µg/ml
Cálcio	absorção atômica	Varian FS 240	0,01 µg/ml
Sulfato	cromatografia	Dionex DX-120	9,09 mg/L

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são abordados os resultados da caracterização do rejeito de carvão bruto, do agregado miúdo produzido a partir do rejeito (AMR), do estudo de sua utilização em substituição ao agregado miúdo natural e do estudo de predição da DAM realizado com o rejeito bruto, AMR e blocos de concreto.

4.1 Composição densimétrica e granulométrica do rejeito bruto

A Figura 29 apresenta a distribuição granulométrica do rejeito bruto. O predomínio, com 72% da massa, é da fração grosseira (-50,8 mm +2,0 mm). O material com granulometria fina (-2,0 mm +0,5 mm) corresponde à 10% do volume do módulo, enquanto que o lodo (-0,5 mm) corresponde à 18%.

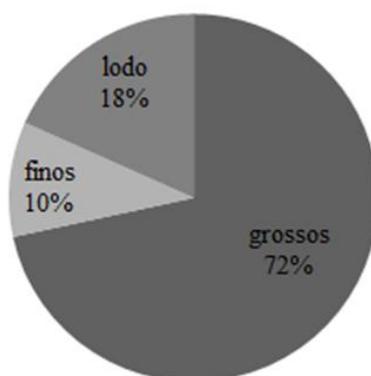


Figura 29: Classificação granulométrica do rejeito bruto.

Esses resultados estão em conformidade com os resultados obtidos por Amaral Filho (2009). De acordo com este autor, a massa do módulo de rejeitos em questão possui a seguinte distribuição granulométrica: 68% de grossos (-50,8 mm +2,0 mm), 15% de finos (-2,0 mm +0,1 mm) e 17% de lodo das bacias de decantação (-0,1 mm). É importante ressaltar que o presente estudo considerou como “lodo” o material com granulometria inferior a 0,5 mm, enquanto Amaral Filho (2009) considerou o material com granulometria inferior a 0,1 mm.

A Tabela 28 apresenta a classificação densimétrica do material e os respectivos teores de C, H, N e S de cada fração. A composição das frações grossa e fina com densidade entre 2,4 e 2,8 corresponde a 44% em massa do rejeito bruto. Ou seja, aproximadamente 44% da massa total da pilha de rejeitos em questão é formada por esse material que será o foco do presente trabalho.

Tabela 28: Classificação densimétrica do rejeito bruto.

fração	densidade relativa	granulometria (mm)	%	cinzas (%)	análise elementar (%)			
					C	H	N	S
grossos	flutuado 2,4	-50,8 +2,0	22%	72	17,5	2,0	0,4	2,8
	entre 2,4 e 2,8	-50,8 +2,0	40%	91	3,1	0,5	0,1	1,8
	afundado 2,8	-50,8 +2,0	10%	72	5,2	0,2	0,1	35,0
finos	flutuado 2,4	-2,0 +0,5	6%	68	20,7	2,3	0,5	2,7
	entre 2,4 e 2,8	-2,0 +0,5	4%	88	3,3	0,7	0,1	2,8
	afundado 2,8	-2,0 +0,5	1%	66	8,8	0,8	0,2	31,7
lodo	-	-0,5	18%	70	18,6	2,0	0,4	4,4
		Total	100%	79	10,4	1,2	0,3	6,0

Utilizando as densidades de corte 2,3 e 2,8, Amaral Filho (2009) concluiu que o material com densidade intermediária (rico em matéria mineral inerte) corresponde a 52,5% da massa original do módulo de rejeitos. A separação densimétrica do presente estudo, que utilizou densidades de corte 2,4 e 2,8, resultou na obtenção de 44% de material rico em matéria mineral inerte. Esse material apresenta alto teor de cinzas ($\cong 90\%$) e baixo teor de enxofre ($\cong 2\%$).

Antes de ser britado para ajuste da granulometria, o material com densidade relativa intermediária foi peneirado utilizando as malhas previstas na NBR 7211 (ABNT, 2005). O resultado é apresentado na Figura 30. Pode-se observar que 66,9% do material com densidade intermediária apresenta granulometria superior a 4,75 mm. Assim, essa fração necessita ser britada para utilização como agregado miúdo.

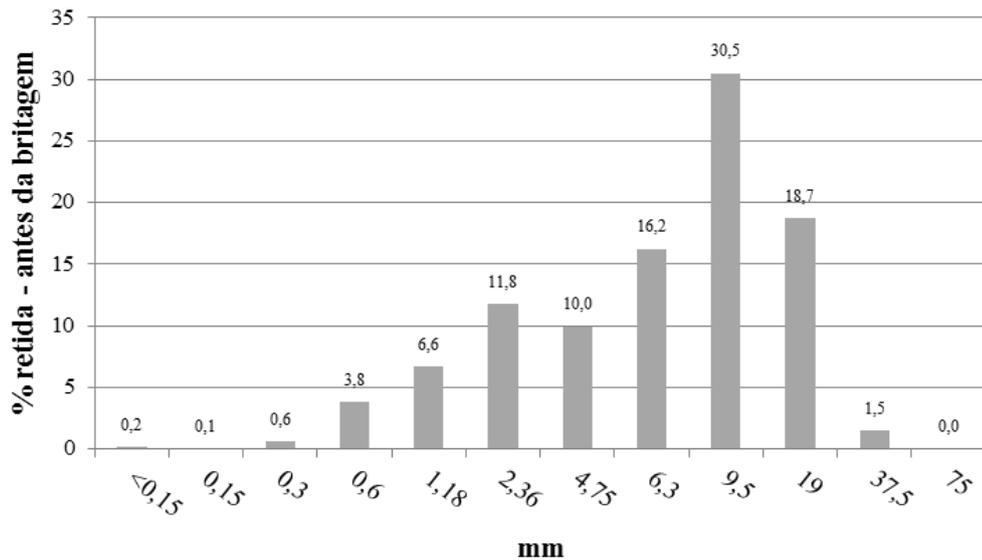


Figura 30: Classificação granulométrica da fração com densidade entre 2,4 e 2,8 antes da britagem.

4.2 Caracterização do Agregado Miúdo Reciclado (AMR)

Após o processo de britagem da fração com densidade intermediária obteve-se o agregado miúdo reciclado de rejeitos de carvão. Esse material foi utilizado para a execução do programa experimental com vista à avaliação da viabilidade de sua utilização como agregado miúdo na fabricação de blocos de concreto para pavimentação. O aspecto visual do AMR pode ser observado na Figura 31.



Figura 31: Agregado miúdo reciclado de rejeitos de carvão.

A Figura 32 apresenta a distribuição granulométrica do AMR por faixa granulométrica e a Figura 33 apresenta a curva granulométrica do material e os limites

os limites estabelecidos na NBR 7211 (ABNT, 2005) para agregado miúdo. Observa-se que o material, após as etapas de britagem, encontra-se dentro dos limites granulométricos para uso como agregado miúdo na produção de concretos.

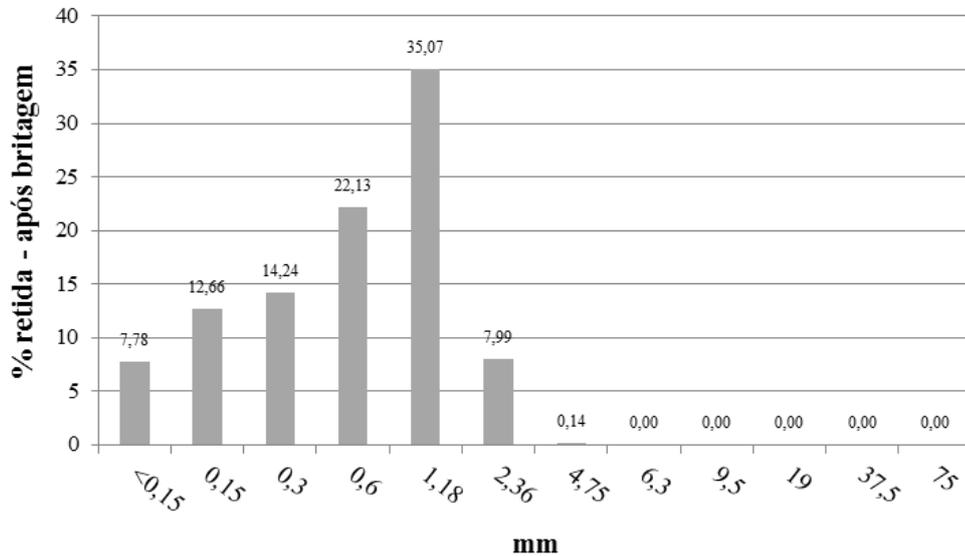


Figura 32: Classificação granulométrica da fração com densidade entre 2,4 e 2,8 (AMR) após britagem.

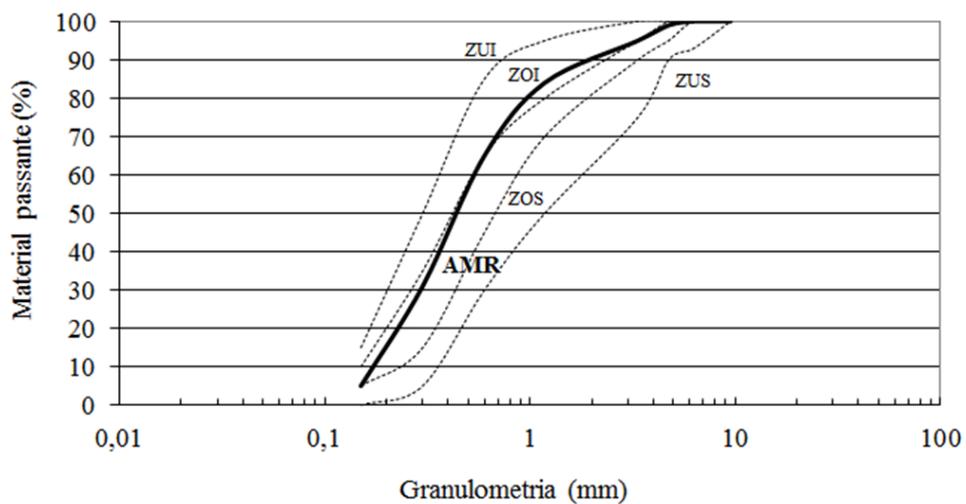


Figura 33: Curva granulométrica do AMR obtido e os limites estabelecidos na NBR 7211 (ZUI – limite inferior, zona utilizável; ZOI – limite inferior, zona ótima; ZOS – limite superior, zona ótima; ZUS – limite superior, zona utilizável).

O ensaio para determinação da massa específica foi realizada de acordo com a NBR NM 52 (ABNT, 2003). O AMR apresentou massa específica de $2,24 \text{ g/cm}^3$.

A determinação da taxa de absorção de água dos agregados miúdos foi realizada de acordo com as prescrições da NBR NM 30 (ABNT, 2001). O AMR apresentou taxa de absorção de 9,35 %. Esse valor é maior do que os encontrados nos agregados miúdos naturais, mostrando uma alta taxa de absorção de água do AMR.

As imagens apresentadas na Figura 34 foram obtidas através do MEV. Nela se pode verificar que os grãos de diferentes faixas granulométricas que compõe o AMR possuem forma pouco esférica e muito angular. Com relação à textura superficial, aparentemente os grãos possuem superfície rugosa (b, d, f).

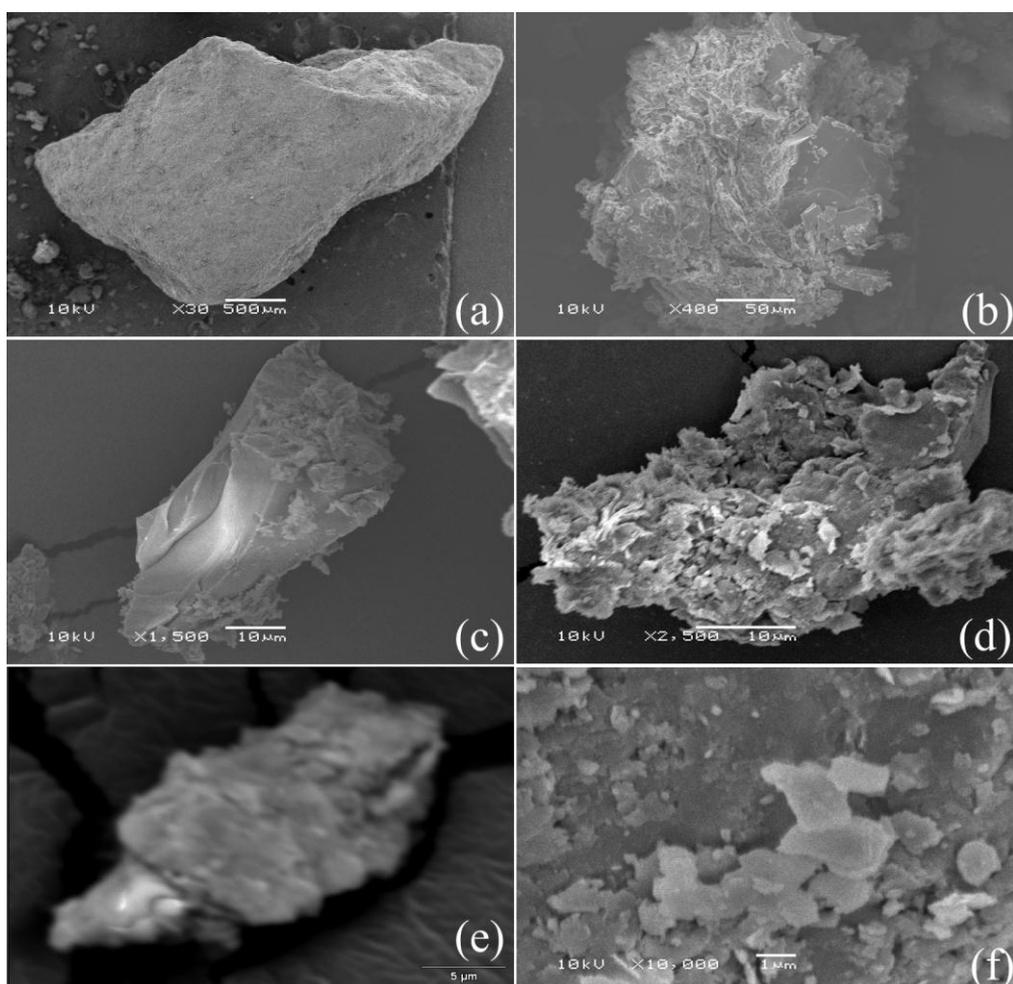


Figura 34: Fotografia de grãos de diferentes granulometrias do AMR.

A Figura 35 apresenta os resultados da análise por fluorescência de raios-x no Rejeito Bruto e no AMR. Observa-se a presença majoritária de silício e alumínio no AMR. Cabe ressaltar que esta análise é semi-quantitativa. Por essa razão os valores de enxofre obtidos nesta análise não ficaram muito próximos aos obtidos por análise

elementar de enxofre via análise elementar (C, H, N, S). Mas é possível perceber a redução dos teores de enxofre e ferro no AMR obtido após a separação em meio denso.

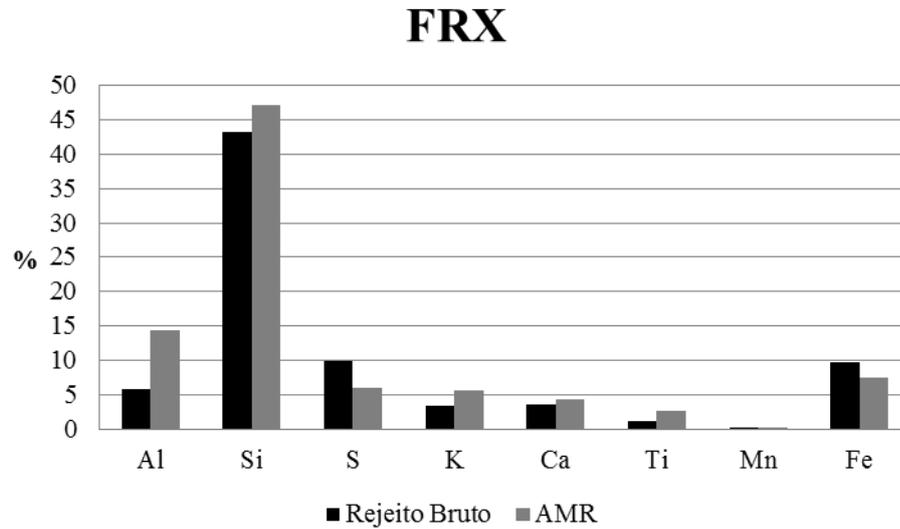


Figura 35: Resultados da Análise por FRX no AMR.

Na Figura 36 são apresentados os resultados da difração de raios X demonstrando a presença majoritária do mineral quartzo (SiO_2) bem como a presença dos minerais illita $((\text{K},\text{H}_3\text{O})(\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2,(\text{H}_2\text{O})])$, caulinita $(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4)$ e gipsita $(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ em menores quantidades.

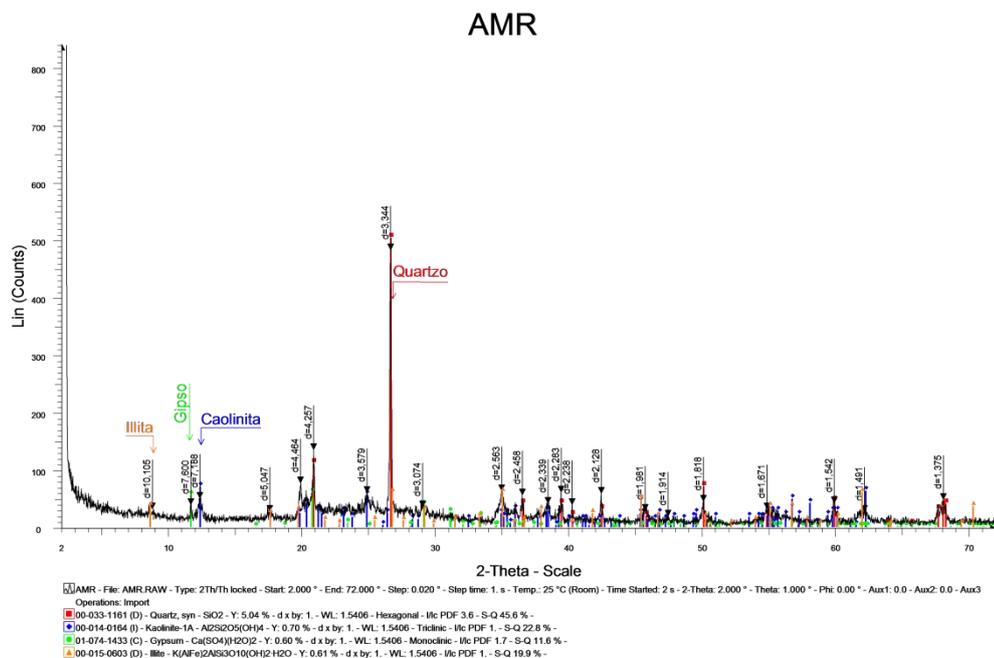


Figura 36: Resultado da análise de difração de raios-x no material de interesse.

A Tabela 29 apresenta o resultado da análise elementar realizada no AMR. A análise elementar (CHNS) foi realizada também no rejeito bruto. Verificou-se que o rejeito bruto apresenta 7% de S e 6,48% de C. Pode-se observar a redução do teor de enxofre total (7% para 1,9%) e carbono total (6,48% para 2,6%) no AMR obtido através do beneficiamento do rejeito bruto.

Tabela 29: Resultado da análise elementar do AMR.

Determinações	Unidade	AMR	Limite de detecção
N	% (m/m)	0,1	-
C	% (m/m)	2,6	-
S	% (m/m)	1,9	-
H	% (m/m)	0,8	-
Carbono orgânico	% (m/m)	1,7	0,01%
Nitrogênio (TKN)	% (m/m)	0,06	0,01%
Potássio total	% (m/m)	0,21	0,02%
Cálcio total	% (m/m)	0,48	0,02%
Cobre total	mg/kg	23	0,02 mg/kg
Zinco total	mg/kg	96	0,6 mg/kg
Ferro total	% (m/m)	1,5	2 mg/kg
Manganês total	mg/kg	154	4 mg/kg
Sódio total	mg/kg	185	20 mg/kg
Cádmio total	mg/kg	< 0,2	0,2 mg/kg
Cromo total	mg/kg	4	0,4 mg/kg
Níquel total	mg/kg	12	0,4 mg/kg
Chumbo total	mg/kg	27	2 mg/kg
Cobalto total	mg/kg	6	0,4 mg/kg
Alumínio total	% (m/m)	0,68	20 mg/kg

As análises de carbono orgânico (via combustão úmida) e total (equipamento elementar Vario Macro) indicam a presença de matéria carbonosa não separada no processo de separação densimétrica. O material também possui quantidades consideráveis de ferro e enxofre em sua composição devido, principalmente, à presença da pirita que não pode ser removida durante a separação por meios densos.

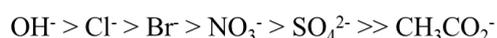
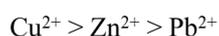
Numa revisão a respeito dos processos de imobilização de contaminantes através do cimento, Dole apud Mattus e Gilliam (1994) discute sobre a complexidade de lidar com misturas de diversos tipos de resíduos. Ele também apresenta o ranking dos ânions e cátions comuns que podem acelerar ou retardar a hidratação de cimento Portland, conforme apresentado na Figura 37. Essa classificação deve ser considerada apenas como um guia geral e é preciso ter cuidado ao usá-la. Já que um cátion não é encontrado

sozinho, e sim associado a pelo menos um ânion, a presença do ânion contribuirá também para o efeito total do sal proveniente dos resíduos nas propriedades do cimento.



←----- Aceleração

Retardamento ----->



←----- Aceleração

Figura 37: Ranking dos ânions e cátions comuns que podem acelerar ou de retardar a hidratação de cimento Portland (Dole apud Mattus e Gilliam, 1994).

Dessa forma, a determinação da especiação química dos elementos presentes na composição do resíduo possui um importante papel na previsão dos efeitos que podem ser ocasionados no concreto produzido com o AMR.

A Tabela 30 apresenta os resultados das análises de matéria volátil, cinzas e umidade e formas de enxofre no AMR.

Tabela 30: Resultados da análise imediata e formas de enxofre no AMR.

Parâmetro	Resultado (%)
Matéria Volátil	9,6
Cinzas	90,0
Umidade	0,6
S total	1,9
S pirítico	1,1
S sulfático	0,5
S orgânico	0,3

O material possui alto teor de cinzas (90%). De acordo com Amaral Filho (2009), o rejeito bruto do módulo possui 77,5% de cinzas. O aumento do teor de cinzas no AMR ocorreu devido à separação por meios densos utilizada no beneficiamento do rejeito bruto. Esse processo permitiu concentrar a fração rica em matéria carbonosa (densidade inferior a 2,4) e gerar um AMR com alto teor de cinzas. O enxofre pirítico apresenta-se em maior quantidade do que o enxofre sulfático e orgânico. Conforme já comentado na discussão a respeito dos resultados da análise elementar, a predominância

do enxofre pirítico ocorre devido à presença da pirita não removida no processo de beneficiamento do rejeito via meio denso.

O resultado do ensaio de lixiviação apresentado na Tabela 31 mostrou que nenhum dos parâmetros analisados excedeu os limites estabelecidos para tal ensaio. Entretanto, o laudo do ensaio de solubilização apresentado na Tabela 32 apontou os parâmetros cromo total, alumínio, ferro, manganês, zinco, fluoreto e sulfato como excedentes dos limites máximos estabelecidos na NBR 10004 (ABNT, 2004). Dessa forma, o resíduo é caracterizado como resíduo classe II-A (não-inerte).

Tabela 31: Resultados do ensaio de lixiviação.

Parâmetro	Unidade	Resultado	Limites máximos
Arsênio	mg/L	ND	1,0
Bário	mg/L	ND	70,0
Cádmio	mg/L	ND	0,5
Chumbo	mg/L	ND	1,0
Cromo Total	mg/L	0,04	5,0
Mercúrio	mg/L	ND	0,1
Fluoreto	mg/L	1,6	150,0
Prata	mg/L	ND	5,0
Selênio	mg/L	ND	1,0

Tabela 32: Resultados do ensaio de solubilização.

Parâmetro	Unidade	Resultado	Limites máximos
Fenóis Totais	mg/L	ND	0,001
Mercúrio	mg/L	ND	0,001
Arsênio	mg/L	ND	0,01
Bário	mg/L	ND	0,7
Cádmio	mg/L	ND	0,005
Chumbo	mg/L	ND	0,01
Cromo Total	mg/L	0,17	0,05
Alumínio	mg/L	10,1	0,2
Ferro	mg/L	40,3	0,3
Manganês	mg/L	9,3	0,1
Sódio	mg/L	1,6	200
Zinco	mg/L	9	5
Cobre	mg/L	0,1	2
Prata	mg/L	ND	0,05
Selênio	mg/L	ND	0,01
Cianeto	mg/L	ND	0,07
Fluoreto	mg/L	2,7	1,5
Nitrato	mg/L	1,1	10
Cloreto	mg/L	4,3	250
Sulfato	mg/L	972	250
Surfactantes	mg/L	ND	0,5

4.3 Estudo da utilização do rejeito de carvão na fabricação de blocos de concreto para pavimentação

Neste item serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados conforme programa experimental proposto através das variáveis de resposta resistência à compressão, resistência à abrasão e absorção de água. Essa etapa do estudo tem o intuito de avaliar a viabilidade técnica de utilização do AMR como substituto ao agregado miúdo natural (areia média) através da interpretação dos resultados utilizando ferramentas estatísticas.

Além da avaliação através da ferramenta estatística ANOVA, cada variável de resposta foi avaliada também através do desvio padrão (σ), que indica o quanto os dados afastaram-se da média, e do coeficiente de variação (C.V.), que indica se o desvio padrão é baixo (menor que 25) ou não (maior que 25). Os resultados obtidos em cada bloco constam no Anexo 1.

4.3.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão é uma variável de resposta do tipo “maior-é-melhor”, sendo expressa em MPa. A resistência à compressão dos blocos ao longo do tempo pode ser analisada a partir da observação dos dados apresentados na Tabela 33 e ilustrada na Figura 38. A Tabela 33 apresenta as médias aritméticas dos resultados para cada idade de cura e teor de substituição estudados, o desvio padrão (σ) e o coeficiente de variação (C.V.). A Figura 38 apresenta o gráfico com a resistência à compressão média obtida em cada idade de cura e teor de substituição.

Tabela 33: Resistência à compressão média (f_c), desvio padrão (σ) e o coeficiente de variação (C.V.) dos dados obtidos nos ensaios de resistência à compressão.

% de substituição	Resistência à compressão média								
	7 dias			28 dias			90 dias		
	MPa	σ	C.V	MPa	σ	C.V	MPa	σ	C.V
0	28,1	2,79	9,93	39,50	2,92	7,40	40,70	0,27	0,66
25	33,0	3,37	10,20	37,58	1,58	4,20	36,20	5,25	14,51
50	34,2	1,35	3,95	36,57	1,40	3,82	34,13	4,38	12,84
75	28,3	1,56	5,49	31,20	2,70	8,66	28,97	3,78	13,07
100	24,8	4,57	18,45	27,32	3,11	11,39	27,22	4,76	17,50

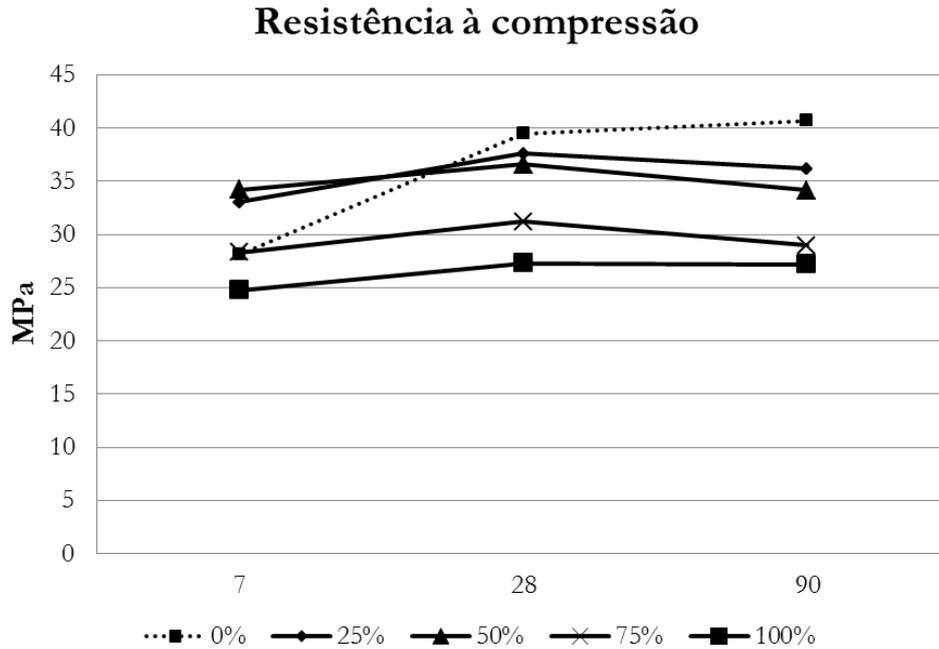


Figura 38: Resistência à compressão dos blocos com diferentes teores de AMR ao longo dos períodos de cura.

Através do desvio padrão e do coeficiente de variação apresentados na Tabela 33, nota-se que os dados obtidos são homogêneos para todas as idades de cura e porcentagens de substituição. Os blocos produzidos com 100% de substituição foram os que apresentaram os maiores coeficientes de variação. Em todas essas ocasiões, o desvio padrão dos dados foi considerado baixo.

A resistência média dos blocos contendo 25% e 50% de substituição atingiram valores semelhantes aos 28 e 90 dias de cura. Comparando com os blocos referência, os blocos 25% e 50% apresentaram valores pouco abaixo aos 28 dias, enquanto que aos 90 dias, os blocos referência apresentam resistência média superior (aproximadamente 5 MPa). Já os blocos com 75% e 100% de substituição atingiram resistências médias muito baixas comparadas as dos blocos referência.

A Figura 39 apresenta o percentual de resistência adquirida pelos blocos em cada intervalo de idade de cura.

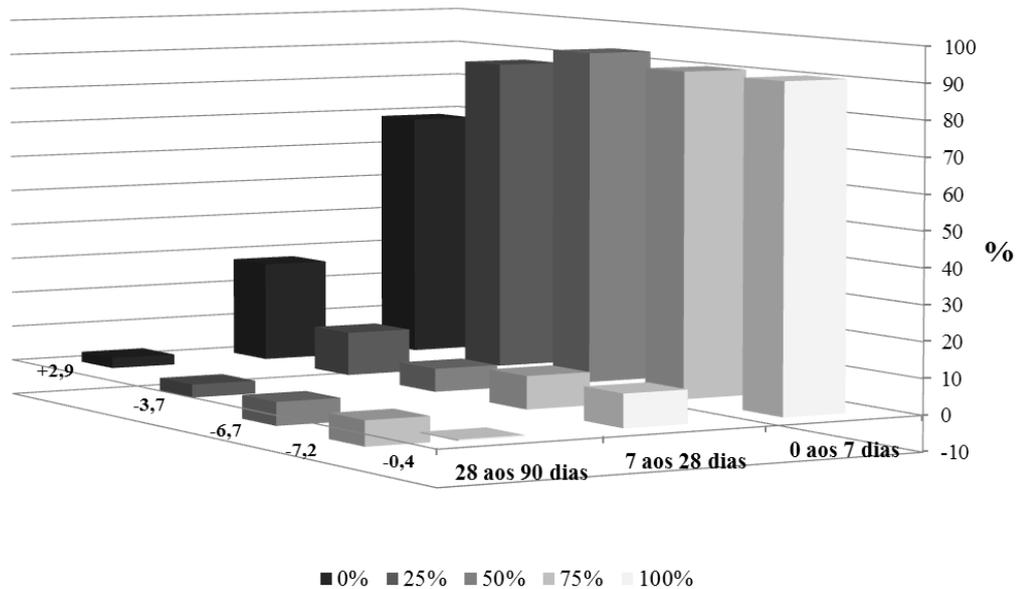


Figura 39: Percentual de resistência adquirida entre os intervalos dos tempos de cura avaliados.

A Figura 39 mostra que o ganho de resistência média os 0 aos 7 dias de cura dos blocos referência foi de aproximadamente 70% em relação à sua resistência total, enquanto que dos blocos produzidos com AMR foi de aproximadamente 90%. A análise da Figura 39 indica que a presença do resíduo pode estar acelerando o processo de hidratação do cimento. Esse argumento é sustentado pelas seguintes constatações: (i) o ganho de resistência média até os 7 dias de cura dos blocos contendo AMR é aproximadamente 20% maior do que o dos blocos referência; (ii) o bloco referência foi o que apresentou maior ganho percentual de resistência dos 7 aos 28 dias de cura, demonstrando que essa foi a única porcentagem de substituição que obteve ganhos expressivos (28%) de resistência média após os 7 dias de cura (os demais apresentaram ganhos em torno de 10%); (iii) os blocos contendo AMR apresentaram ligeiras perdas de resistência média dos 28 aos 90 dias de cura (3,7%, 6,7%, 7,2% e 0,4%), indicando que a resistência máxima pode ter sido atingida aos 28 dias de cura.

A Tabela ANOVA é apresentada na Tabela 34. A análise dos resultados obtidos através da ferramenta estatística ANOVA é apresentada na Tabela 35. Nela são apresentados quais níveis do fator % de substituição apresentam diferença significativa do ponto de vista estatístico em cada uma das idades de cura onde a resistência à compressão foi avaliada.

Tabela 34: Tabela ANOVA para resistência à compressão.

Fonte de variação	Soma de quadrados	GDL	Médias quadradas	Teste F	F tab	Significativo?
idade	376,2	2	188,1	17,84	3,12	sim
% de substituição	1339,0	4	334,8	31,75	2,49	sim
idade*% de substituição	344,9	8	43,1	4,09	2,06	sim
Erro	790,9	75	10,5			
Total	2850,9	89				

Tabela 35: Resultado da ANOVA para os dados de resistência à compressão.

% de substituição	Resistência à compressão ¹ (MPa)		
	7 dias	28 dias	90 dias
0	28,1 ± 2,794 ^a	39,5 ± 2,92 ^a	40,7 ± 0,27 ^a
25	33,0 ± 3,37 ^b	37,6 ± 1,58 ^a	36,2 ± 5,25 ^b
50	34,2 ± 1,35 ^b	36,6 ± 1,40 ^a	34,1 ± 4,38 ^b
75	28,3 ± 1,56 ^a	31,2 ± 2,70 ^b	29,0 ± 3,78 ^c
100	24,8 ± 4,57 ^a	27,3 ± 3,11 ^b	27,2 ± 4,76 ^c

¹Média ± desvio padrão.

Valores com letras iguais, comparados na vertical, não diferem significativamente entre si.

De acordo com a Tabela ANOVA, ambos os fatores controláveis (idade de cura e porcentagem de substituição) exercem influência significativa sobre a resistência à compressão dos blocos, assim como a sua interação. Para identificar qual (ou quais) dos percentuais de substituição é (ou são) significativamente diferente(s) nas três idades de cura avaliadas, assim como a magnitude dessa diferença, foi realizado o teste de Tukey. O resultado do teste de Tukey pode ser visualizado através da Tabela 35 e da Figura 38.

Através do resultado do teste de Tukey, verifica-se que: (i) aos 7 dias de cura, os blocos referência, 75% e 100% não apresentam diferença significativa entre si e diferem significativamente dos blocos 25% e 50%. Os blocos 25% e 50% apresentaram as maiores resistências e não apresentam diferença significativa entre si; (ii) aos 28 dias de cura, os blocos referência, 25% e 50% não apresentam diferença significativa entre si e diferem significativamente dos blocos 75% e 100%. Os blocos referência, 25% e 50% apresentaram as maiores resistências e não apresentam diferença significativa entre si; (iii) aos 90 dias de cura, os blocos referência apresentaram diferença significativa para

os blocos 25% e 50%. Estes, por sua vez, apresentam diferença para os blocos 75% e 100%. Os blocos referência apresentaram as maiores resistências.

4.3.2 Resistência à abrasão

A resistência à abrasão é expressa pelo índice de desgaste por abrasão. O índice de desgaste por abrasão é uma variável de resposta do tipo “menor-é-melhor”, sendo expresso em mm. Quanto menor o índice de desgaste, maior a resistência à abrasão do bloco. O índice de desgaste por abrasão dos blocos ao longo do tempo pode ser analisado a partir da observação dos dados apresentados na Tabela 36 e através da Figura 40. A Tabela 36 apresenta as médias dos resultados para cada idade de cura e teor de substituição estudados, o desvio padrão (σ) e o coeficiente de variação (C.V.). A Figura 40 apresenta o gráfico com os índices de desgaste por abrasão em cada idade de cura e teor de substituição.

Tabela 36: Resistência à abrasão média, expressa pelo índice de desgaste por abrasão médio (mm), desvio padrão (σ) e o coeficiente de variação (C.V.) dos dados obtidos nos ensaios de resistência à abrasão.

% de substituição	Índice de desgaste à abrasão médio					
	28 dias			90 dias		
	mm	σ	C.V	mm	σ	C.V
0	9,34	0,00	0,00	6,60	0,00	0,00
25	9,33	1,63	17,43	7,50	1,30	17,35
50	9,40	0,00	0,00	7,88	0,00	0,00
75	8,76	0,28	3,23	8,12	0,49	6,01
100	10,51	0,13	1,21	11,44	3,03	26,45

Através do desvio padrão e do coeficiente de variação apresentados na Tabela 36, nota-se que os dados obtidos são homogêneos para todas as idades de cura e porcentagens de substituição, exceto para os blocos com 100% de substituição aos 90 dias de cura. Os resultados desses blocos apresentaram um alto desvio padrão.

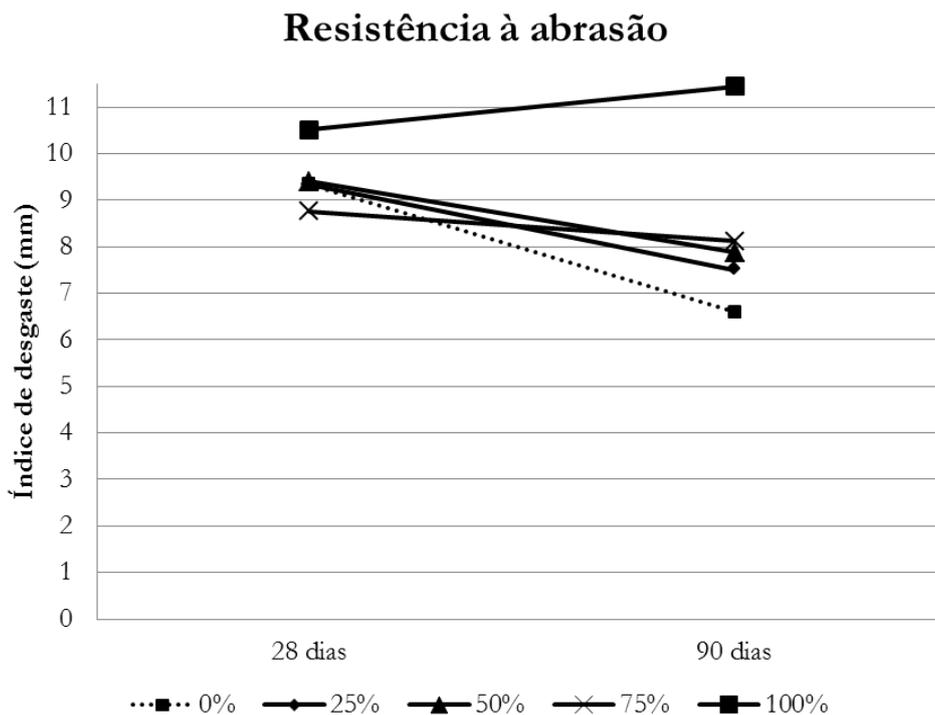


Figura 40: Índice de desgaste por abrasão dos blocos com diferentes teores de AMR ao longo dos períodos de cura.

Através da Figura 40 é possível perceber que o aumento do teor de substituição da areia média natural pelo AMR não apresenta uma correlação linear (quanto maior a porcentagem de substituição, maior o índice de desgaste à abrasão) aos 28 dias, somente nos 90. Aos 28 dias o índice dos blocos referência, 25% e 50% ficaram bastante próximos e o bloco 75% apresentou o menor índice. Aos 90 dias o bloco referência apresentou o menor índice, e os blocos 25%, 50% e 75% resultados semelhantes. Os blocos produzidos com o teor de substituição 100% apresentaram os maiores índices de desgaste por abrasão em ambas as idades de cura.

A Tabela 37 apresenta o percentual de redução do índice de desgaste por abrasão dos blocos em cada intervalo de idade de cura.

Tabela 37: Percentual de redução do índice de desgaste por abrasão entre os intervalos dos tempos de cura avaliados.

% de substituição	Percentual de redução do índice de desgaste por abrasão	
	0 aos 28 dias	28 aos 90 dias
0%	-41,5	-58,5
25%	-24,4	-75,6
50%	-19,3	-80,7
75%	-7,9	-92,1
100%	0,0	8,8

Da mesma forma como se procedeu com os resultados de resistência à compressão, o objetivo dessa análise é avaliar se a presença do resíduo interfere no aumento da resistência à abrasão ao longo do tempo. Espera-se que quanto maior a idade de cura, maior a resistência à abrasão, medida através do índice de desgaste por abrasão. Esse tipo de análise não pôde ser realizada com os blocos com 100% de substituição devido ao fato de que os blocos com 28 dias apresentaram maior índice de desgaste por abrasão do que os com 90 dias de cura, o que não era esperado.

É possível perceber que dos 0 aos 28 dias de cura, quanto maior a porcentagem de substituição, menor é o percentual de redução do índice de desgaste por abrasão (ou maior é o ganho percentual de resistência à abrasão). Já no período de cura entre os 28 e 90 dias, quanto maior a porcentagem de substituição, maior é o percentual de redução do índice de desgaste por abrasão (ou menor é o ganho percentual de resistência à abrasão). Sendo uma variável de resposta do tipo “menor-é-melhor”, quanto maior a porcentagem de redução do índice de desgaste por abrasão, maior é a porcentagem de ganho de resistência à abrasão. Ou seja, o aumento do teor de AMR nos blocos faz com que o aumento da resistência à abrasão ocorra mais lentamente. Conforme visto no item 2.4.1, essa propriedade está intimamente ligada à resistência à compressão. O fato do aumento do teor de AMR nos blocos desacelerar o ganho de resistência à abrasão não é coerente com a hipótese levantada após análise do gráfico do ganho percentual de resistência à compressão (Figura 39). Se o AMR estivesse acelerando o processo de hidratação do cimento, era esperado que o aumento do teor de AMR também acelerasse o ganho de resistência à compressão, o que não ocorreu.

A Tabela ANOVA é apresentada na Tabela 38. A análise dos resultados obtidos através da ferramenta estatística ANOVA é apresentada na Tabela 39. Nela são

apresentados quais níveis do fator % de substituição apresentam diferença significativa do ponto de vista estatístico, assim como a Figura 41, onde as barras contínuas foram inseridas sobre as médias que não diferem entre si.

Tabela 38: Tabela ANOVA para resistência à abrasão.

Fonte de variação	Soma de quadrados	GDL	Médias quadradas	Teste F	F tab	Significativo?
idade	6,7	1,00	6,74	4,87	4,96	não
% de substituição	22,7	4,00	5,69	4,11	3,48	sim
idade*% de substituição	7,7	4,00	1,93	1,39	3,48	não
Erro	13,8	10,00	1,38			
Total	51,0	19,00				

De acordo com a Tabela ANOVA, apenas o fator porcentagem de substituição exerce influência significativa sobre a resistência à abrasão dos blocos. Para identificar qual (ou quais) dos percentuais de substituição é (ou são) significativamente diferente(s) nas três idades de cura avaliadas, assim como a magnitude dessa diferença, foi realizado o teste de Tukey. O resultado do teste de Tukey pode ser visualizado através da Tabela 39 e da Figura 41.

Tabela 39: Resultado da ANOVA para os dados de resistência à abrasão.

% de substituição	Índice de desgaste por abrasão ¹ (mm)	
	28 dias	90 dias
0	9,34 ± 0,00 ^a	6,60 ± 0,00 ^a
25	9,33 ± 1,63 ^a	7,50 ± 1,30 ^a
50	9,40 ± 0,00 ^a	7,88 ± 0,00 ^a
75	8,76 ± 0,28 ^a	8,12 ± 0,49 ^a
100	10,51 ± 0,13 ^b	11,44 ± 3,03 ^b

¹Média ± desvio padrão.

Valores com letras iguais, comparados na vertical, não diferem significativamente entre si.



Figura 41: Gráfico de barras indicando o índice de desgaste por abrasão médio obtido para cada porcentagem de substituição.

Através do teste de Tuckey, verificou-se que os teores de substituição 25%, 50% e 75% não impactam negativamente na resistência à abrasão dos blocos de concreto. Já o teor 100% apresentou resultados insatisfatórios.

4.3.3 Absorção de água

A absorção de água dos blocos aos 28 dias de cura pode ser analisada a partir da observação dos dados apresentados na Tabela 40, que apresenta as médias dos resultados para cada idade e teor de substituição estudados e o desvio padrão (σ) e o coeficiente de variação (C.V.).

Tabela 40: Absorção de água média, desvio padrão (σ) e o coeficiente de variação (C.V.) dos dados obtidos nos ensaios de absorção de água.

% de substituição	absorção média (%)	σ	C.V
0	4,9	0,00	0,00
25	5,3	0,11	1,99
50	5,4	0,00	0,00
75	6,9	0,65	9,46
100	8,1	0,80	9,97

Através do desvio padrão e do coeficiente de variação apresentados na Tabela 40, nota-se que os dados obtidos são homogêneos, sendo o teor de 25% o que apresentou menor variação.

O aumento do teor de substituição da areia média natural pelo AMR apresenta correlação linear com a absorção de água dos blocos. Quanto maior o teor de substituição, maior é a absorção de água.

A Tabela ANOVA é apresentada na Tabela 41. A análise dos resultados obtidos através da ferramenta estatística ANOVA é apresentada na Tabela 42. Nela são apresentados quais níveis do fator % de substituição apresentam diferença significativa do ponto de vista estatístico, assim como a Figura 42, onde as barras contínuas foram inseridas sobre as médias que não diferem entre si.

Tabela 41: Tabela ANOVA para absorção de água.

Fonte de variação	Soma de quadrados	GDL	Médias quadradas	Teste F	F tab	Significativo?
SQG	13,8	4,00	3,46	12,81	5,19	sim
SQR	1,1	5,00	0,27			
Total	14,9	9,00				

Tabela 42: Resultado da ANOVA para os dados de absorção de água.

% de substituição	Absorção de água ¹ (%)
0	4,90 ± 0,00 ^a
25	5,35 ± 0,11 ^a
50	5,42 ± 0,00 ^a
75	6,88 ± 0,65 ^b
100	8,05 ± 0,80 ^c

¹Média ± desvio padrão.

Valores com letras iguais, comparados na vertical, não diferem significativamente entre si.

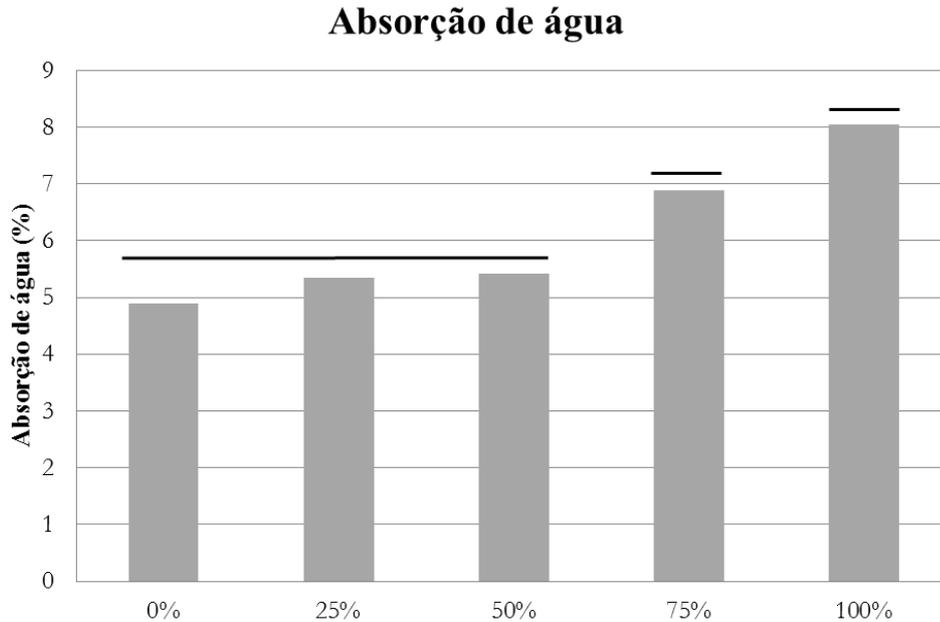


Figura 42: Gráfico de barras indicando a absorção de água média obtido para cada porcentagem de substituição.

Através da Tabela ANOVA, verificou-se que o teor de substituição exerce influência significativa sobre a absorção de água dos blocos. Para identificar qual (ou quais) dos percentuais de substituição é (ou são) significativamente diferente(s) nas três idades de cura avaliadas, assim como a magnitude dessa diferença, foi realizado o teste de Tukey. O resultado do teste de Tukey pode ser visualizado através da Tabela 42 e da Figura 42. Os blocos referência, 25% e 50% não possuem diferença significativa entre os valores de absorção de água. Já os blocos 75%, assim como os blocos 100%, apresentam diferença significativa para os demais teores de substituição, indicando que estes teores de substituição podem gerar um incremento significativo nos valores de absorção dos blocos produzidos. O resultado do teste de Tukey indica que substituição da areia média natural por AMR nos teores 25% e 50% não impacta negativamente a absorção de água dos blocos de concreto.

4.3.4 Dificuldades encontradas durante a produção dos blocos de concreto

Durante as concretagens verificaram-se pequenas diferenças na trabalhabilidade dos concretos produzidos com AMR. Quanto maior a quantidade de AMR no concreto maior foi a formação de grumos que nucleavam o agregado graúdo durante a mistura na betoneira. A Figura 43 apresenta os grumos formados durante a mistura dos materiais na produção dos blocos com 100% de substituição.



Figura 43: Formação de grumos durante a mistura dos materiais.

Além de serem prejudiciais à resistência do concreto, impedindo que o cimento seja misturado ao restante dos materiais de forma homogênea, os grumos também são prejudiciais ao acabamento dos blocos. Em todas as concretagens foi efetuado o desmanche de parte dos grumos manualmente. No entanto isso apenas minimizou o problema. Alguns blocos apresentaram problemas de acabamento na superfície devido ao excesso de grumos. Um estudo futuro específico para dosagem dos materiais no concreto, incluindo o AMR, é importante para produção de blocos com bom acabamento.

Durante algumas moldagens foi encontrada dificuldade de remoção dos blocos dos moldes da vibro-prensa, mesmo com a utilização de desmoldante. Alguns blocos ficavam aderidos aos extratores que realizam a sua compactação. Isso acaba reduzindo o adensamento do bloco e, conseqüentemente, a resistência à compressão do bloco é afetada negativamente, assim como a sua resistência à abrasão e absorção de água. Esse problema foi verificado em alguns poucos blocos (cerca de 8%) durante a fabricação dos corpos-de-prova contendo as diferentes porcentagens de substituição. Entretanto, durante a remoção dos blocos referência (data de moldagem 2) e dos blocos 50% de substituição (data de moldagem 1) esse problema ocorreu em praticamente todos os blocos (ver Figura 19). Isso foi refletido nos péssimos resultados obtidos nas 3 variáveis de resposta avaliadas. Como exemplo, pode-se citar os resultados obtidos com os blocos referência (sem a presença de AMR na composição) na data de moldagem 1, onde a resistência à compressão média dos blocos aos 28 e 90 dias foi de 40 e 41 MPa, respectivamente. Já a resistência à compressão média dos blocos referência aos 28 e 90 dias na data de moldagem 2 foi de 23 e 27 MPa, respectivamente. Por essa razão, ao

invés de utilizar na ANOVA os resultados dos blocos referência produzidos na data de moldagem 2 e dos blocos 50% produzidos na data de moldagem 1, optou-se por repetir os valores obtidos na outra data de moldagem para essas duas porcentagens de substituição para todas as variáveis de resposta. A utilização desses dados na análise estatística iria resultar em conclusões equivocadas a respeito da viabilidade técnica de utilização do AMR em substituição ao agregado miúdo natural.

A Figura 44 apresenta alguns blocos que apresentaram problemas de acabamento.



Figura 44: Problemas de acabamento nas superfícies dos blocos.

4.4 Avaliação do potencial de geração de acidez

Essa etapa do estudo teve o intuito de avaliar a viabilidade ambiental de utilização do AMR como substituto ao agregado miúdo natural (areia média) através dos estudos de predição da geração de DAM do AMR e dos blocos produzidos com AMR em substituição ao agregado miúdo natural (areia média).

4.4.1 Ensaios estáticos

A Tabela 43 apresenta os resultados dos ensaios estáticos do rejeito bruto, do AMR e dos blocos com 0% (referência), 50% e 100% de substituição do agregado miúdo natural pelo AMR.

Tabela 43: Resultados dos ensaios estáticos do rejeito bruto, do AMR e dos blocos 0% (referência), 50% e 100% de substituição.

Propriedade	Rejeito Bruto	AMR	Bloco Ref	Bloco 50%	Bloco 100%
S total (%)	7,0	1,9	0,5	0,9	0,8
AP (kg CaCO ₃ /t)	218,84	60,81	15,73	27,55	23,69
NP (kg CaCO ₃ /t)	0,00	0,00	241,00	488,25	504,23
NNP	-218,84	-60,81	225,27	460,70	480,54
NPR	0,00	0,00	15,32	17,72	21,28
Formação de DAM	sim	sim	não	não	não

Os valores de NNP e NPR do rejeito bruto são -218,84 e 0,00 kg CaCO₃/t, respectivamente, enquanto que do AMR são -60,81 e 0,00 kg CaCO₃/t, respectivamente. O potencial de geração de acidez do AMR foi substancialmente reduzido em relação ao do rejeito bruto. Contudo, ambos os materiais são passíveis de geração de DAM, pois os valores do NNP são inferiores a -20 kg CaCO₃/t.

Os valores de NNP e NPR do bloco referência são 225,27 e 15,32 kg CaCO₃/t, respectivamente. Os valores de NNP e NPR do bloco com 50% de substituição são 460,70 e 17,72 kg CaCO₃/t e dos blocos com 100% de substituição são 480,54 e 21,28 kg CaCO₃/t, respectivamente. Esses índices indicam que os blocos não são passíveis de geração de DAM, pois os valores são superiores a + 20 kg CaCO₃/t. Com relação aos resultados obtidos nos blocos contendo AMR (50% e 100% de substituição), o baixo AP é devido a diluição do AMR na massa do concreto e o alto NP é decorrente da alta alcalinidade do cimento. A situação pode ser caracterizada como um processo de solidificação/estabilização do resíduo beneficiado, já que o AMR é gerador de DAM.

4.4.2 Ensaio cinéticos

Ao analisar e interpretar dados de testes cinéticos deve-se observar que os procedimentos dos testes têm como objetivo simular o comportamento do intemperismo em longo prazo de grandes volumes de rejeitos ou materiais. Neste estudo, embora a duração do teste tenha sido de 20 semanas, o tempo é curto em relação ao ciclo de vida das pilhas de rejeitos e dos blocos. Entretanto, através do teste cinético utilizado é possível prever tendências dos materiais estudados com relação à cinética do processo

de geração de DAM. No presente trabalho, ensaios cinéticos em células úmidas foram realizados no rejeito de carvão bruto, no AMR e com fragmentos dos blocos de concretos confeccionados com os seguintes níveis de substituição de agregado natural por AMR: 0%, 50% e 100%.

As Figuras 45 e 46 apresentam, respectivamente, os valores do pH e do Eh da água de lixiviação. Em relação ao pH, pode se observar que o rejeito bruto e o AMR geram um lixiviado ácido. O pH variou entre 3,3 e 1,3 para o rejeito bruto e entre 4,0 e 2,6 para o AMR. Como, esperado, por conter menos enxofre, o lixiviado da célula com amostra de AMR apresenta valores de pH pouco superiores aos de célula contendo amostra de rejeito bruto. Em relação aos blocos de concreto, em todas as situações, o pH da água manteve-se na faixa neutra/alcalina, com o pH variando entre 8,3 e 11,8 para o bloco de referência, entre 10,3 e 7,9 para o bloco com 50% de substituição e entre 11,3 e 6,3 para o bloco com 100% de substituição.

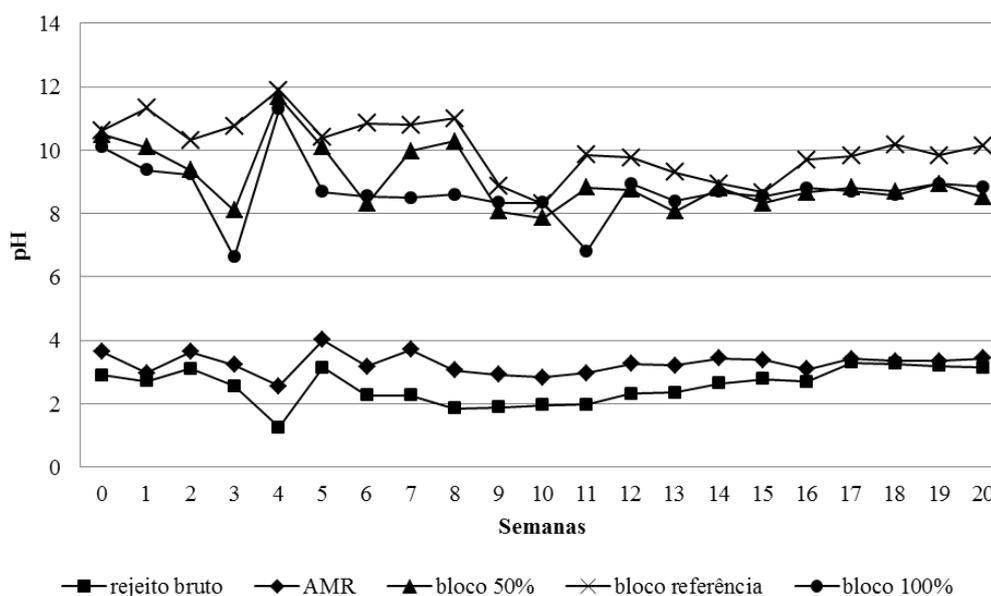


Figura 45: Valores de pH nos lixiviados das células contendo amostras de rejeito bruto, AMR e de blocos contendo 0%, 50% e 100% de AMR em substituição ao agregado miúdo natural.

Em relação ao Eh, a amostra de rejeito bruto e o AMR proporcionaram um potencial redox altamente oxidante. O Eh da amostra de rejeito bruto variou entre 672 e 851 mV e o Eh da amostra do AMR variou entre 631 e 809 mV. Apesar do comportamento semelhante, é possível observar que o Eh na água de lixiviação do rejeito bruto manteve-se sempre acima do Eh na água de lixiviação do AMR, o que pode ser explicado pela maior oxidação do Fe^{+3} proveniente da pirita. As curvas geradas

com os resultados de Eh obtidos nos lixiviados das células contendo amostras do bloco referência e 50% e 100% de substituição apresentam comportamento bastante similar, com valores abaixo de 500 mV durante todo o experimento, exceto pela semana 10.

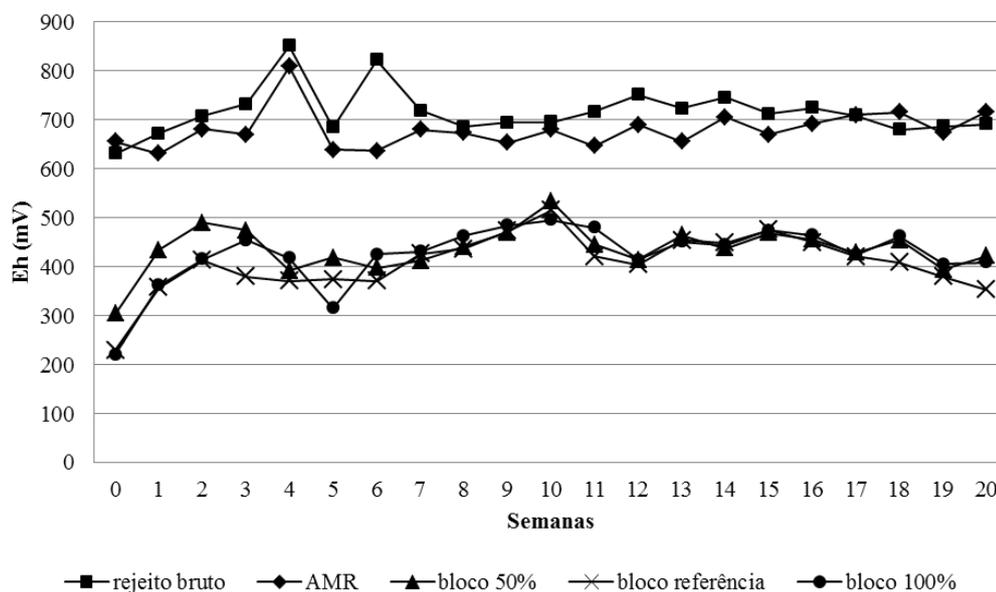


Figura 46: Valores de potencial redox nos lixiviados das células contendo amostras de rejeito bruto, AMR e de blocos contendo 0%, 50% e 100% de AMR em substituição ao agregado miúdo natural.

A Figura 47 mostra os valores de acidez medidos na água de lixiviação da amostra de rejeito bruto e do AMR. Pode-se observar que os índices de acidez são substancialmente superiores na amostra de rejeito bruto (chegando a valores de 5000 a 7000 mg/kg CaCO₃), indicativo do menor pH do meio e de maior concentração de espécies metálicas hidrolisáveis (principalmente o Fe). A presença de acidez é nula ou muito baixa na água de lixiviação das amostras dos blocos de concreto, de forma que foi medida a alcalinidade total (Figura 48). Os resultados de alcalinidade dos lixiviados da amostra do bloco de referência são bastante altos nas primeiras duas semanas (acima de 1600 mg/kg CaCO₃). A partir da semana 2 os valores de alcalinidade já se reduzem, oscilando entre 575 e 805 mg/kg CaCO₃ até a semana 5. A partir da semana 6, os resultados da amostra do bloco referência apresenta curva bastante semelhante às das amostras de blocos com 50% e 100% de substituição. Os valores encontrados na amostra do bloco 50% variaram entre 104 e 414 mg/kg CaCO₃, enquanto que na amostra do bloco 100% variam entre 104 e 322 mg/kg CaCO₃.

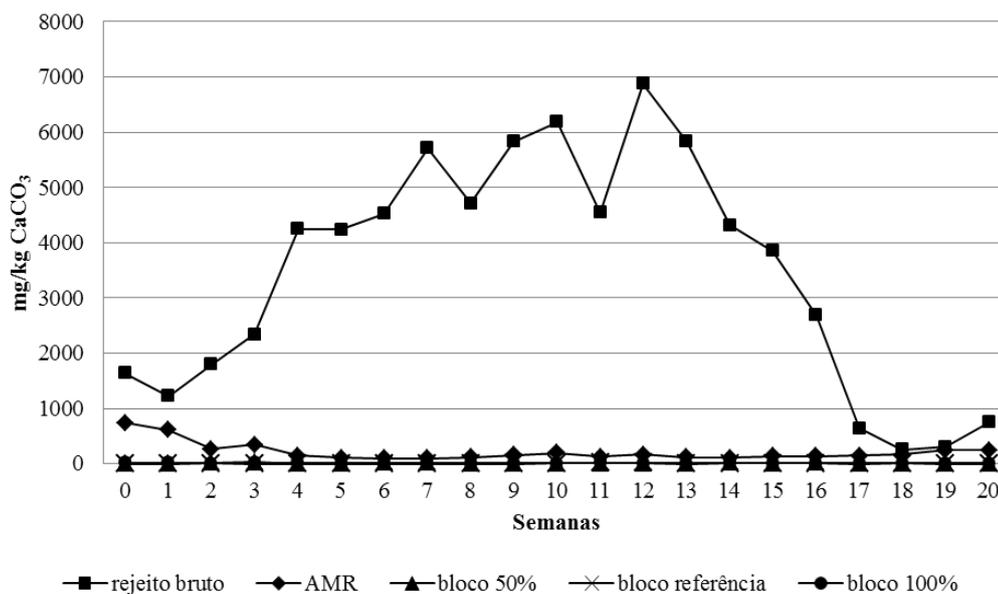


Figura 47: Valores de acidez nos lixiviados das células contendo amostras de rejeito bruto, AMR e de blocos contendo 0%, 50% e 100% de AMR em substituição ao agregado miúdo natural.

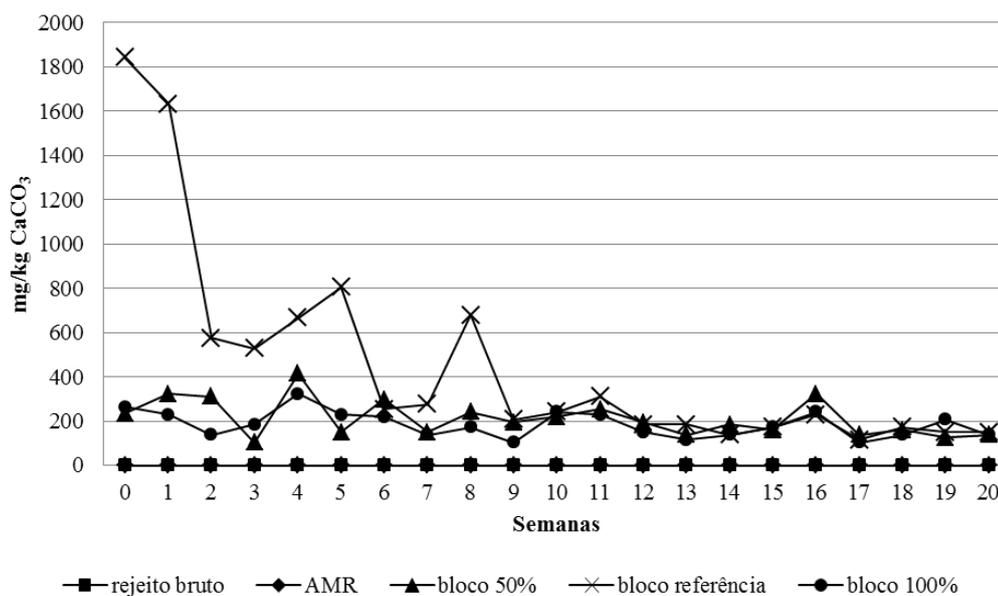


Figura 48: Valores de alcalinidade total nos lixiviados das células contendo amostras de rejeito bruto, AMR e de blocos contendo 0%, 50% e 100% de AMR em substituição ao agregado miúdo natural.

As Figuras 49, 50, 51, 52 e 53 apresentam, respectivamente, a concentração dos metais Fe, Al, Mn, Zn e Ca na água de lixiviação. Pode-se observar que as concentrações dos metais de transição (Fe, Al, Mn e Zn) são muito altas na água de lixiviação da amostra do rejeito bruto; em especial o ferro, o metal liberado diretamente devido à oxidação da pirita. Para a amostra do AMR, esses valores foram

substancialmente reduzidos em função da menor concentração de sulfeto. Porém, na água de lixiviação dos blocos de concreto, a presença destes metais praticamente não foi detectada, mostrando que estes metais ficam imobilizados na massa de concreto.

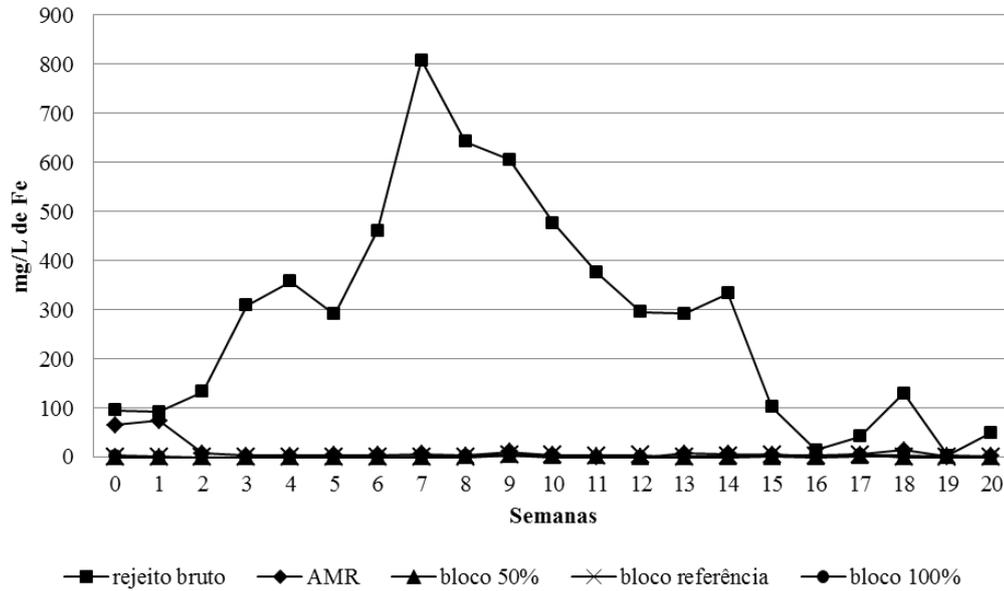


Figura 49: Valores de ferro nos lixiviados das células contendo amostras de rejeito bruto, AMR e de blocos contendo 0%, 50% e 100% de AMR em substituição ao agregado miúdo natural.

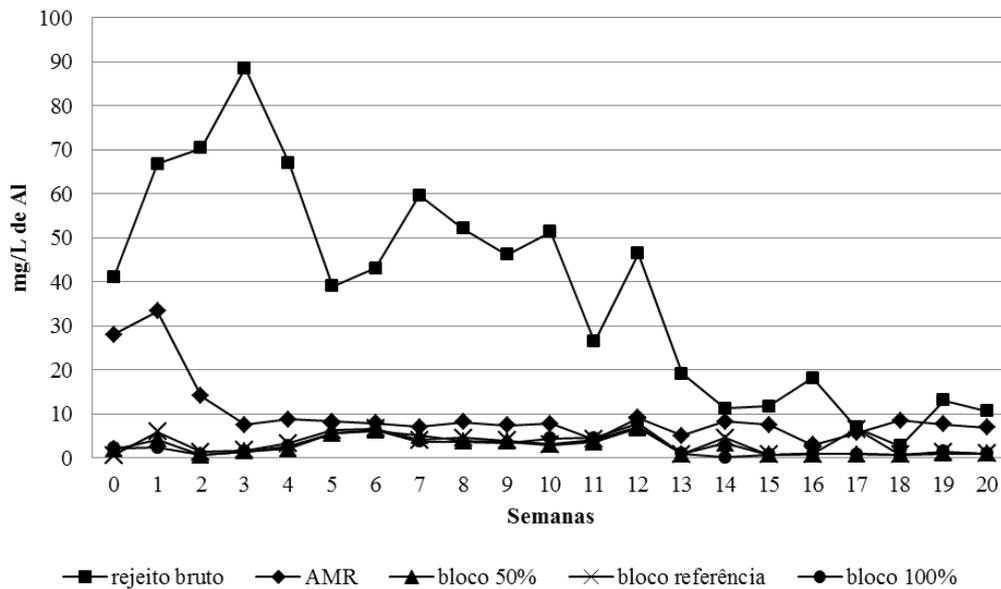


Figura 50: Valores de alumínio nos lixiviados das células contendo amostras de rejeito bruto, AMR e de blocos contendo 0%, 50% e 100% de AMR em substituição ao agregado miúdo natural.

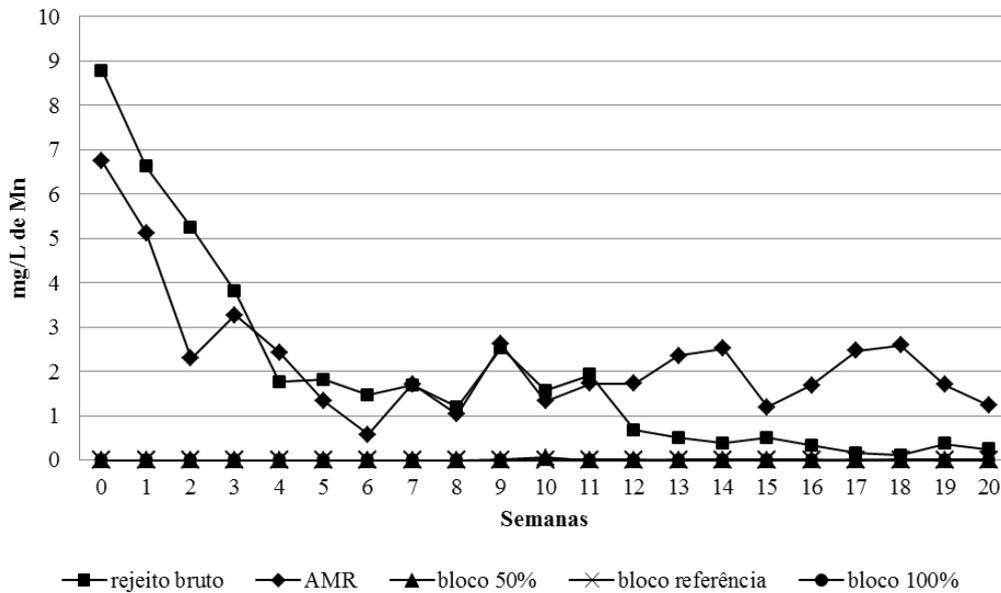


Figura 51: Valores de manganês nos lixiviados das células contendo amostras de rejeito bruto, AMR e de blocos contendo 0%, 50% e 100% de AMR em substituição ao agregado miúdo natural.

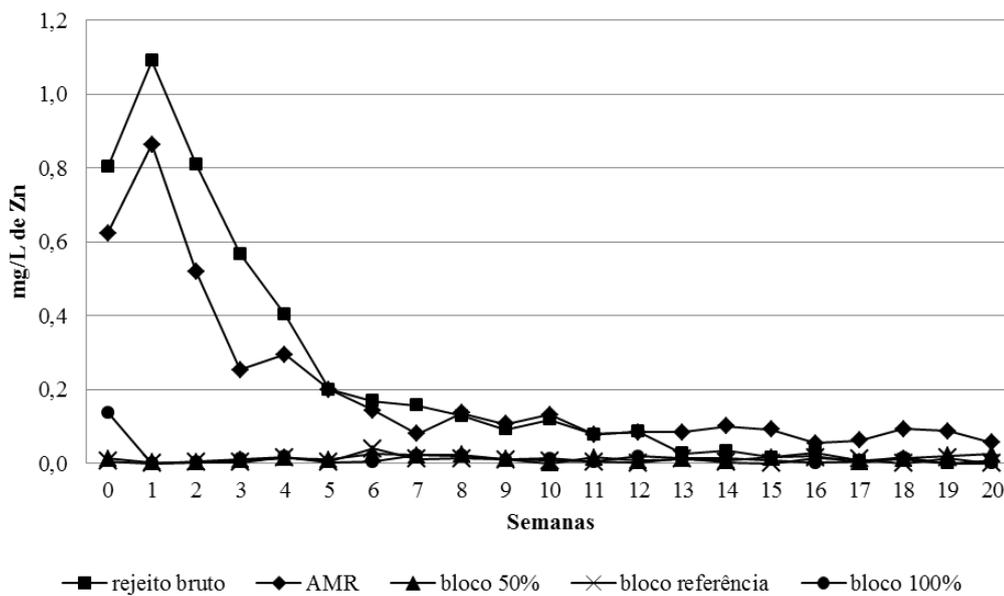


Figura 52: Valores de zinco nos lixiviados das células contendo amostras de rejeito bruto, AMR e de blocos contendo 0%, 50% e 100% de AMR em substituição ao agregado miúdo natural.

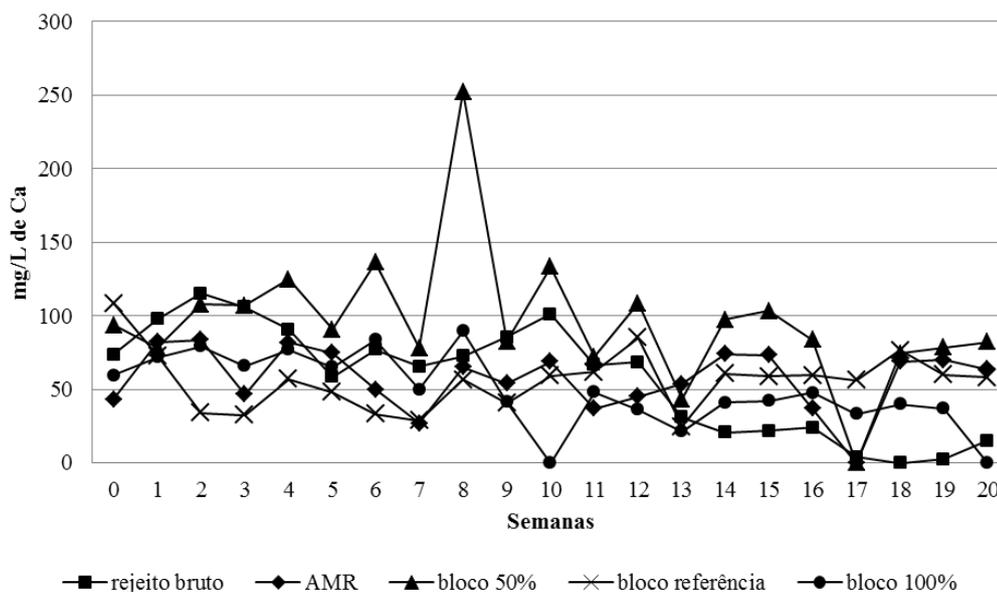


Figura 53: Valores de cálcio nos lixiviados das células contendo amostras de rejeito bruto, AMR e de blocos contendo 0%, 50% e 100% de AMR em substituição ao agregado miúdo natural.

Porém, em relação ao cálcio, o comportamento foi diferente. As concentrações de cálcio dos lixiviados das cinco amostras apresentam valores semelhantes. A liberação do cálcio da amostra de rejeito bruto e do AMR ocorre pela acidificação do meio, provavelmente solubilizando o cálcio presente na forma carbonatos e sulfatos. Nos blocos de concreto, a liberação de cálcio é decorrente da alta concentração deste elemento na matriz do cimento e devido à possibilidade de que nem todo o cálcio tenha se transformado em compostos inertes.

A Figura 54 apresenta os valores de sulfato da água de lixiviação. Percebe-se que a concentração de sulfatos na água de lixiviação da amostra de rejeito bruto apresenta altos valores durante todo o experimento. No entanto, durante as últimas semanas a concentração apresenta valores próximos aos valores obtidos com as demais amostras. Nos lixiviados da célula contendo amostra de AMR, a concentração de sulfato apresenta valores bastante inferiores aos do rejeito bruto durante todo o experimento. Nos lixiviados das células contendo amostras dos blocos, as curvas de sulfato não apresentam variação e valores inferiores. No entanto, os valores registrados nos lixiviados dos blocos 50% e 100% são bastante próximos aos registrados nos lixiviados do AMR. As concentrações de ferro nos blocos 50% e 100% (Figura 49) indicam que o ferro se mantém na estrutura do concreto enquanto que o enxofre é lixiviado gerando o

sulfato. Isso pode gerar pequenos espaços que podem ser prejudiciais à resistência do concreto em longo prazo.

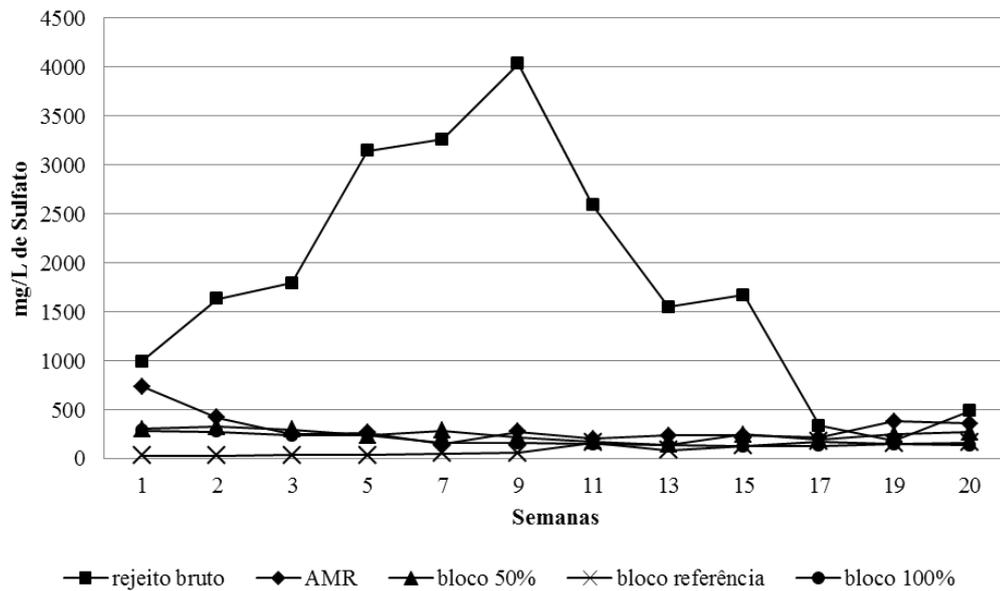


Figura 54: Valores de sulfato nos lixiviados das células contendo amostras de rejeito bruto, AMR e de blocos contendo 0%, 50% e 100% de AMR em substituição ao agregado miúdo natural.

Após a análise dos gráficos gerados com os resultados das análises químicas dos lixiviados das células úmidas, verifica-se que as amostras de rejeito bruto e de AMR apresentam valores que atestam a capacidade de geração de DAM destes materiais. No entanto, percebe-se que a DAM gerada na amostra de AMR é bem menos concentrada do que a gerada pelo rejeito bruto. Os resultados obtidos com os lixiviados dos blocos indicam que a incorporação do AMR no concreto inibiu a capacidade do resíduo de gerar DAM.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As conclusões e recomendações são apresentadas separadamente para cada uma das principais etapas que constituem o presente estudo. São elas: beneficiamento do rejeito bruto a fim de obter o AMR para produção dos blocos; caracterização do AMR gerado; produção dos blocos de concreto para pavimentação com diferentes teores de substituição do agregado miúdo natural por AMR e avaliação de suas propriedades; avaliação do potencial de geração de acidez dos blocos produzidos, assim como do rejeito bruto e do AMR.

Processo de beneficiamento para obtenção do AMR

Através do processo de beneficiamento utilizado, aproximadamente 44% do módulo corresponde à fração rica em material inerte.

A disposição dos rejeitos provenientes do beneficiamento dos finos ($> 0,5$ mm) juntamente com os rejeitos com granulometria grosseira formam torrões de difícil desagregação, o que representa um impeditivo para separação densimétrica do material disposto no módulo. No entanto, a aplicação de processos densimétricos da fração grosseira do rejeito gerado no processo de jigagem (R1, R2 e R3) se apresenta viável para concentração da fração rica em matéria mineral inerte, a qual possui características favoráveis para utilização na fabricação de concreto.

Caracterização do AMR

O AMR apresenta características favoráveis para emprego na fabricação de blocos de concreto para pavimentação, exceto pelo seu teor de enxofre e matéria carbonosa. A quantidade de enxofre total ($\cong 2\%$) e matéria carbonosa ($\cong 10\%$) representam uma limitação ao potencial de utilização como agregado miúdo na produção de concreto.

Em contrapartida, é importante ressaltar que o material foi beneficiado em escala laboratorial. A qualidade do AMR obtido está intimamente ligada ao processo de beneficiamento utilizado. O beneficiamento do rejeito bruto para concentração da fração rica em material mineral inerte através do processo de jigagem em escala industrial pode gerar um AMR com diferentes teores de enxofre e matéria carbonosa. Paralelamente, estudos relacionados ao grau de liberação da pirita (fonte de enxofre) e do carvão antecedendo a separação gravimétrica como objetivo de redução dos teores

são recomendados, assim como estudos de processos para redução desses teores após a obtenção do agregado miúdo reciclado como, por exemplo, através do beneficiamento de finos em espirais).

Propriedades dos blocos de concreto para pavimentação produzidos

De uma forma geral, percebe-se que quanto maior é o teor de substituição do agregado miúdo natural por AMR, piores são os resultados de resistência à compressão, de resistência à abrasão e de absorção de água. Entretanto, em algumas ocasiões, a presença do rejeito não impactou negativamente as três variáveis de resposta avaliadas.

a) Resistência à Compressão

De acordo com a análise estatística, ambos os fatores controláveis (idade de cura e porcentagem de substituição) exercem influência significativa sobre a resistência à compressão dos blocos, assim como a sua interação.

Através do teste de Tuckey, verificou-se que, aos 28 dias, a resistência média à compressão dos blocos referência não diferem significativamente das resistências médias à compressão dos blocos 25% e 50%.

b) Resistência à Abrasão

De acordo com a análise estatística, o fator porcentagem de substituição exerce influência significativa sobre a resistência à abrasão dos blocos.

Através do teste de Tuckey, verificou-se que os teores de substituição 25%, 50% e 75% não impactam negativamente a resistência à abrasão dos blocos de concreto. Já o teor 100% apresentou resultados insatisfatórios.

c) Absorção de Água

De acordo com a análise estatística, o fator porcentagem de substituição exerce influência significativa sobre a absorção de água dos blocos.

Através do teste de Tuckey, verificou-se que os teores de substituição 25% e 50% não impactam negativamente a absorção de água dos blocos de concreto.

d) Geral

Em suma, verificou-se que os teores de substituição 25% e 50% são as porcentagens de substituição que apresentam possibilidade de aplicação na fabricação de blocos de concreto para pavimentação, sem que estes apresentem qualidade inferior à de blocos convencionais, considerando as variáveis de resposta estudadas.

Estudo de predição de geração da DAM

É possível afirmar que a incorporação do Agregado Miúdo Reciclado no concreto inibe a geração de DAM, já que os resultados estáticos e cinéticos comprovam que não foi gerado efluente ácido proveniente dos blocos de concreto submetidos aos ensaios. Contudo, é recomendado continuar o experimento com as células úmidas com o objetivo de verificar se a curva dos resultados dos parâmetros monitorados já se encontra estabilizada.

Conclusão final

Os resultados obtidos nas condições estudadas indicam a viabilidade de utilização da fração rica em matéria mineral inerte como substituto ao agregado miúdo natural na fabricação de blocos de concreto para pavimentação nos teores de 25% e 50% de substituição. Além disso, verificaram-se problemas de acabamento em alguns blocos.

6 ESTUDOS FUTUROS

- Determinar o teor de sulfatos e de materiais carbonosos no AMR conforme métodos de ensaios previstos na NBR 7211 (NBR 9917 para teor de sulfatos e ASTM C 123 para materiais carbonosos);
- Realizar estudos que avaliem se o teor de carvão no AMR obtido pode ser problemático;
- Determinar os teores de enxofre e de materiais carbonosos em amostras obtidas através de beneficiamento em escala industrial do rejeito. Essas análises indicariam a necessidade ou não de posterior processamento (remoção de carvão e de enxofre) para utilização da fração rica em material inerte na fabricação de concreto;
- Estudos que objetivem a redução dos teores de matéria carbonosa e enxofre na fração rica em matéria mineral gerada;
- Estudos que avaliem as propriedades requeridas dos blocos em períodos mais longos de cura;
- Estudo relacionado à composição química do AMR, onde a especiação química dos principais elementos e seus efeitos sobre a qualidade do concreto sejam determinados;
- Utilização de métodos de dosagem para determinação de traço economicamente viável e que produza blocos de concreto para pavimentação com acabamento e propriedades requeridas aceitáveis;
- Estudar o emprego de porcentagens de substituição próximas a 50%, já que pequenas variações de teores de resíduo no concreto podem causar grandes alterações na resistência;
- Caracterizar conforme a NBR 10004 os blocos de concreto produzidos com AMR;
- Determinar o tempo de pega do concreto produzido com AMR utilizando a NBR 9832;

- Realizar estudo semelhante utilizando um agregado com a distribuição granulométrica idêntica ao do AMR ao invés de areia natural. Dessa forma, elimina-se a interferência que a diferença entre a granulometria dos dois materiais pode exercer sobre os resultados;
- Dar continuidade aos ensaios cinéticos realizados no presente estudo;
- Estudar o emprego de outras técnicas de predição da geração de DAM para comparar com os resultados obtidos;
- Estudar o emprego da substituição do agregado graúdo por rejeito de carvão beneficiado;
- Realizar análises colorimétricas nos blocos de concreto para verificar se o AMR apresenta influência sobre a coloração dos mesmos;
- Construção de um pavimento real com blocos de concreto produzidos com AMR e avaliação de suas propriedades ao longo do tempo.

7 REFERÊNCIAS

- ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland). Manual de Pavimento Intertravado. [s.n.]: São Paulo, 2009. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/solucoesparacidades/colaborativo/download.purificaphp?set=passeio_publico>. Acesso em: 03 abr. 2010.
- ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland). Banco de Pautas, 2009. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/imprensa/pavimento-intertravado-e-alternativa-sustentavel-para-economia-de-recursos>>. Acesso em: 10 abr. 2012.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 30. Agregado miúdo - Determinação da absorção de água, Rio de Janeiro. 2001.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 52. Determinação da massa específica e massa específica aparente, Rio de Janeiro. 2009.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 248. Agregados - Determinação da composição granulométrica, Rio de Janeiro. 2003.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7211. Agregados para Concreto, Rio de Janeiro. 2005.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8289. Carvão mineral - Determinação do teor de cinzas - Método de ensaio. Rio de Janeiro. 1983a.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8290. Carvão mineral - Determinação do teor de materiais voláteis - Método de ensaio. Rio de Janeiro. 1983b.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8293. Carvão mineral - Determinação de umidade - Método de ensaio. 1983c.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8738. Carvão Mineral – Ensaio Densimétrico, Rio de Janeiro. 1985.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9780. Peças de concreto para pavimentação determinação da resistência à compressão - Método de ensaio, Rio de Janeiro. 1987.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9781. Peças de concreto para pavimentação - Especificação, Rio de Janeiro. 1987.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9917. Agregados para concreto – Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis, Rio de Janeiro. 2009.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004. Resíduos sólidos – Classificação, Rio de Janeiro. 2004.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10007. Amostragem de resíduos sólidos, Rio de Janeiro. 2004.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12118. Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Métodos de ensaio, Rio de Janeiro. 2001.
- Amadei, D. I. B. Avaliação de blocos de concreto para pavimentação produzidos com resíduos de construção e demolição do município de Juranda/PR. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana. Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2011.

- Amaral Filho, J. R. Avaliação ambiental e do potencial de aproveitamento de um módulo de rejeitos de carvão na região carbonífera de Santa Catarina. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2009.
- American Public Health Association – APHA. Standard Methods for the examination of water and wastewater. 21. Ed. Washington D.C.: APHA-AWWA-WEF, 2005.
- American Society for testing and Material – ASTM. ASTM C 123: Standard Test Method for Lightweight Particles in Aggregate. USA, 1998.
- American Society for testing and Material – ASTM. ASTM D 5744: Standard test method for accelerated weathering of solid materials using a modified humidity cell. USA, 1996.
- Araújo, A. C. Introdução. Em: Valadão, G. E. S; Araújo, A.C. (Org). Introdução ao tratamento de minérios. Belo Horizonte: editora UFMG, cap. 1., p.11-16, 2007.
- Barreto, M. L. Mineração e desenvolvimento sustentável: Desafios para o Brasil. 3ª Edição. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001. 215p.
- Bian, Z.; Inyang, H.; Daniels, J.; Otto, F.; Struthers, S. Environmental issues from coal mining and their solutions. Mining Science and Technology (China), Vol. 20, No. 2, p. 215–223, 2010.
- Bicca, I. S. Estudo da viabilidade de utilização do rejeito cerâmico, como agregado graúdo, na produção de concreto com características estruturais. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 86 p., 2000.
- Borma, L. S.; Soares, P.S.M. Drenagem ácida e gestão de resíduos sólidos de mineração. Em: Extração de Ouro – Princípios, tecnologia e meio ambiente., Trindade, B.E.; Barbosa Filho, O. (Eds), CETEM, p.243 - 266, 2002.
- Brandão, P. R. G.; Cançado, R. Z. L.; Santos, L. D.; Vasconcelos, O. R. Caracterização Mineralógica e Tecnológica. Em: Valadão, G.E.S; Araújo, A.C (org.). Introdução ao tratamento de minérios. Belo Horizonte: editora UFMG, cap.3, p.27-60, 2007.
- Brasil. Lei 12.305, de 2 de Agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. 2010
- Brasil. Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Energia 2030; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2007.
- Brunstrom, G. R. “Considerations on the choice of concrete block paving at Massey Coal Terminal, Newport News, Virginia”, Second International Conference on Concrete Block Paving, Delft, Holanda, p. 160-167, 1984.
- Cairns, J., Gregory, G. “A case for the preferential use of concrete block paving in residential streets”, 8th International Conference on Concrete Block Paving, San Francisco, California, USA, p. 583-588, 2006.
- Campitelli, V. C. Porosidade do concreto. São Paulo: departamento de Engenharia de Construção Civil. EPUSP, 1987. 15p (boletim técnico 09)
- Canibaño, J. G. Latest Developments in the Utilization of Coal Mining Wastes. Coal Science and Technology, Vol. 24, p. 1629-1632, 1995.

- Casanova, I.; Agulló, L.; Aguado, A. Aggregate expansivity due to sulfide oxidation — I. Reaction system and rate model. *Cement and Concrete Research*, Vol.26, No.7, p. 993-998. 1996.
- Casanova, I.; Aguado, A.; L. Agulló. Aggregate expansivity due to sulfide oxidation — II. Physico-chemical modeling of sulfate attack. *Cement and Concrete Research*, Vol.27, No.11, p. 1627-1632. 1997.
- Cebeci, Y., Aslan. Using float-sink data in simple equations to predict sulfur content. *Fuel Processing Technology*, v. 76; p 231-239. 2002.
- Chandler, A. J.; Eighmy, T. T.; Hartlén, J.; Hjelm, O.; Kosson, D. S.; Sawell, S. E.; van der Sloot, H. A.; Vehlow, J. *Studies in Environmental Science. Volume 67. Municipal Solid Waste Incinerator Residues*. 974p. 1997.
- Chateau, L. Environmental acceptability of beneficial use of waste as construction material—State of knowledge, current practices and future developments in Europe and in France. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 139, No 3, p. 556-562, 2007.
- Chikkatura, A. P.; Sagarb, A. D.; Sankar, T. L. Sustainable development of the Indian coal sector. *Energy*, Vol. 34, No. 8, p. 942–953. 2009.
- Clifton, J. R.; Brown, P. W.; Frohnsdorff, G. Uses of waste materials and by-products in construction - Part II. *Resource Recovery and Conservation*, Vol. 5, No 3, p. 217-228, 1980.
- Colling, A. V. Oxidação da pirita por via bacteriana em rejeitos de carvão para a produção de sulfato férrico. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2010.
- Cook, J. “Concrete block paving at UK military airfields”, 8th International Conference on Concrete Block Paving, San Francisco, California, USA, p. 779-788, 2006.
- Concrete Manufacturers Association (CMA). *Concrete Block Paving - Book 2: Design Aspects*. Fourth edition, 2004.
- Concrete Manufacturers Association (CMA). *Concrete block paving: Cost comparison between concrete block paving and premix asphalt*. Midrand, South Africa: 2009.
- Costa, C. E. Incorporação de rejeitos na indústria cerâmica. *Qualidade na construção*, n. 12, ano II. São Paulo: SindusCon, 1998. p. 44-46.
- Costa, J. F. C. L.; Koppe, J. C.; Souza, L. E.; Pilger, G. G. Distribuição espacial de concreções piríticas e sua influência na performance de conjuntos mecanizados em mina de carvão. *Rem, Rev. Esc. Minas*, Vol. 54, No.4. 2001.
- Cullinane, M. J.; Jones, L. W.; Malone, P. G. *Handbook for Stabilization/Solidification of Hazardous Waste*. EPA/540/2-86/001. USEPA Hazardous Waste Engineering Research Laboratory, Cincinnati, Ohio. 1986
- Dal Molin, D. C. C.; Kulakowski, M. P.; Ribeiro, J. L. D. Contribuições ao planejamento de experimentos em projetos de pesquisa de engenharia civil. *Ambiente Construído*, Vol. 5, No. 8, p. 37-49. 2005.
- Dowson, A., J. “A manufacturer's perspective of variation within the production process of concrete paving blocks”, Third International Workshop on Concrete Block Paving, Cartagena de Indias, Colombia, p. 10-1 - 10-10, 1998.

- EPA (U.S. Environmental Protection Agency). USEPA Method Study 37 SW-846 Method 3050 Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils. 1989.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency). Coal refuse. Advanced Notice of Proposed Rulemaking – Identification of Nonhazardous Materials That Are Solid Waste. 2008.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency). EPA 530-R-94-036. Acid Mine Drainage Prediction. 1994. 48p. (Technical Document).
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency). Technology Performance Review: Selecting and Using Solidification/Stabilization for Site Cleanup. 2009
- Fabro, F.; Gava, G. P.; Grigoli, H. B.; Meneghetti, L. C. Influência da forma dos agregados miúdos nas propriedades do concreto. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, vol. 4, No 2, p. 191-212, 2011.
- Farfan, J. R. J. Z.; Barbosa Filho, O.; Souza, V. P. Avaliação do potencial de drenagem ácida de rejeitos da indústria mineral. Série Tecnologia Ambiental, CETEM/MCT, Rio de Janeiro, v. 29, 58p, 2004.
- Farias, M. M.; Palmeira, E. M. Agregados para a construção civil. In: ISAIA, G.C. (Ed.). Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo: IBRACON, 2007. v. 1. p.481-523.
- Felipe, A., S. Contribuição para a otimização de traços de concreto utilizados na produção de blocos estruturais. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São Paulo, 2010.
- Féris, L. A. Aproveitamento de subprodutos do beneficiamento de carvão mineral na remoção de poluentes por sorção-flotação FAD. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 176p. 2001.
- Fioriti, C. F.; Ino, A.; Akasaki, J. L. Avaliação de blocos de concreto para pavimentação intertravada com adição de resíduos de borracha provenientes da recauchutagem de pneus. Revista Ambiente Construído, v. 7, n. 4, p. 43-54, 2007.
- Franco, J. M. Produção de blocos de concreto para pavimentação (BCP) utilizando resíduos de galvanoplastia. 2006. Monografia (Mestrado em Engenharia Urbana) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2011.
- Frasson Junior, A. Proposta de Metodologia de Dosagem e Controle do Processo Produtivo de Blocos de Concreto para Alvenaria Estrutural. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, 2000.
- Galery, R.; Valadão, G. E. S.; Viana, P. R. M. V.; Araujo, C. A. Fragmentação. Em: Valadão, G.E.S; Araújo, A.C (org.). Introdução ao tratamento de minérios. Belo Horizonte: editora UFMG, cap.5, p.85-104, 2007.
- Galvão, J. C. A. Estudo das propriedades dos concretos confeccionados com cimento CP-V-ARI e CP-II-F 32, sob diferentes temperaturas de mistura e métodos de cura. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e Processos, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2003.

- Gavronski, J. D. Carvão mineral e as energias renováveis no Brasil. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 290p. 2007.
- Giurco, D.; Cooper, C. Mining and sustainability: asking the right questions. *Minerals Engineering*, Vol. 29, p. 3–12. 2012.
- Glasser, F. P. Fundamental aspects of cement solidification and stabilization. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 52, Nos 2–3, p. 151–170, 1997.
- Glasser, F. P. Progress in the Immobilization of Radioactive Wastes in Cement. *Cement and Concrete Research*, vol. 22, Nos. 2-3, p. 201-206, 1992.
- Gomides, M., J. Investigação de agregados contendo sulfetos e seus efeitos sobre a durabilidade do concreto. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- Guevara, L. R. Z. Predição do potencial de drenagem ácida de minas utilizando o método cinético da coluna de lixiviação. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.
- Haibin, L; Zhenling, L. Recycling Utilization Patterns of Coal Mining Waste in China. *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 54, No 12, p.1331-1340. 2010.
- Hammond, A. A. Mining and quarrying wastes: A critical review. *Engineering Geology*, Vol. 25, No 1, p. 17-31, 1988.
- Helene, P.; Terzian, P. Manual de dosagem e controle do concreto. Ed. PINI. 1º ed. 1993.
- Hewlett, P. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. 4ª Edição. Butterworth-Heinemann, 2003. 1092p.
- Hood, R., S., S. Análise da viabilidade técnica da utilização de resíduos de construção e demolição como agregado miúdo reciclado na confecção de blocos de concreto para pavimentação. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- International Organization for Standardization – ISO. ISO 157: hard coal – determination of forms of sulfur. 1996.
- Janzen, M. P.; Nicholson, R. V.; Schärer, J. M. Pyrrhotite reaction kinetics: reaction rates for oxidation by oxygen, ferric iron, and for nonoxidative dissolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 64, No 9, p. 1511–1522. 2000.
- Joukoski, A. Estudo do desempenho de concretos para artefatos de redes de distribuição de energia elétrica destinadas a ambientes litorâneos. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e Processos, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2003.
- Kontopoulos, A. Acid mine drainage control. In: CASTRO, S.H.; VERGARA, F.; SÁNCHEZ, M.A (eds.). *Effluent treatment in the mining industry*. University of Concepción, 1998.

- Lapakko, K. Solid Phase Characterization in Conjunction with Dissolution Experiments for Prediction of Drainage Quality. In: Mining and Mineral Processing Wastes. Proceedings of the Western Regional Symposium on Mining and Mineral Processing Wastes, May 30 - June 1, 1990, Berkley, California p.31-39. Edited by Fiona Doyle, Published by the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Littleton, CO. 1990.
- Leenders, P. "The Use of Waste Material in Concrete Products", 2nd International Conference on Concrete Block Paving, Delft, Holanda, p. 276-280, 1984.
- Lemeshev, V. G.; Gubin, I.K.; Save'ev, Yu.A.; Tumanov, D.V.; Lemeshev, D.O. Utilization of Coal-Mining Waste in the Production of Building Ceramic Materials. Glass and Ceramics, vol.61, Nos. 9-10. p.308-311. 2004.
- Leonard, J. W., et al. Coal Preparation. Leonard, J.W. (ed.). The American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc., Nova York, EUA, cap.9-10, 1979.
- Lima; A. L. C. Influência da presença de sulfetos na implantação da UHE Irapé – Vale do Jequitinhonha – Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. Núcleo de Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais, 2009.
- Lin, S. L.; Cross, W. H.; Chian, E. S. K.; Lai, J. S.; Giabbai, M.; Hung, C. H. Stabilization and solidification of lead in contaminated soils. Journal of Hazardous Materials, vol. 48, Nos 1–3, p. 95-110, 1996.
- Machado, L. A. Ensaios estáticos e cinéticos para a prevenção da geração de drenagem ácida de minas na mineração de carvão com cinzas de termoeletrica e escória de aciaria. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 98 p. 2007.
- Malviya, R.; Chaudhary, R. Factors affecting hazardous waste solidification/stabilization: a review. Journal of Hazardous Materials, vol. 137, No 1, p. 267-276, 2006.
- Markus, R. Elementos de estatística aplicada. Porto Alegre: Faculdade Agronomia UFRGS, 1973. 328 p.
- Mattus, C. H. and Gilliam, T. M. A Literature Review of Mixed Waste Components: Sensitives and Effects upon Solidification/Stabilization in Cement-based Matrices, Oak Ridge National Laboratory, Martin Marietta Energy Systems, Inc, 1994. 118p.
- McAllister, M. L; Milioli, G. Mining sustainably: opportunities for Canada and Brazil. Mineral & Energy, Lulea, v. 15, n.2, p. 3-14, Sep. 2000.
- Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. p. 674.
- MEND (Mine Environmental Neutral Drainage) Program., Environment Canada, Acid Rock Drainage Prediction Manual, Mend, Project 1.16.1b CANMET, 1991.
- Menezes, J. C. S. S. Produção de coagulantes férricos na mineração de carvão. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2009.

- Miller-Cook, D. "Concrete block paving - Survey of industrial applications in the UK", First International Conference on Concrete Block Paving, Newcastle, UK, p. 70-78, 1980.
- Ministério da Ciência e Tecnologia. Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM. Balanço mineral brasileiro. Brasília, 2001.
- Neville, A. Propriedades do concreto. 2. Ed. São Paulo: Pini, 1997.
- Oliveira, A. L. Contribuição para a Dosagem e Produção de Peças de Concreto para Pavimentação. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- Pagnussat, D. T. Utilização de escória granulada de fundição (EGF) em blocos de concreto para pavimentação. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 145 p., 2004.
- Pastore, E.L.; Miotto, J.A. Impactos ambientais em mineração com ênfase à drenagem mineira ácida e transporte de contaminantes. Solos e rochas: revista latino-americana de geotecnia. São Paulo: v. 23, n. 1, p. 33-53, 2000.
- Petrucci, E. G. R. Concreto de cimento Portland. 8. Ed. Editora Globo. Rio de Janeiro. 1981.
- Pettermann, R. Avaliação do desempenho de blocos de concreto para pavimentação com metacaulim e sílica ativa. 2006. Monografia (Especialização em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- Pollard, S. J. T.; Sollars, C. J.; Perry, R. The reuse of spent bleaching earth for the stabilisation/solidification of mixed waste streams, Environ. Technol., vol. 11, No 12, p. 1113-1122, 1990.
- Poon, C. S.; Clarck, A. I.; Perry, R. Permeability Study on the Cement Based Solidification for the Disposal of Hazardous Wastes. Cement and Concrete Research, Vol. 16, p. 161-172. 1986.
- Pozzobon, C. E.; Ruppenthal, J. E. "Algumas implicações entre construção civil e meio ambiente", Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Rio de Janeiro, Brasil, Anais, 1999.
- Purificação, E. B. Estudo do uso de agregados reciclados de concreto e substituição do cimento por resíduo de polimento de porcelanato na produção de piso intertravado de concreto. 2009. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- Rodrigues, P. P. F. Fabricação de blocos pré-moldados de concreto para pavimentação – prática recomendada. 2ª Ed. São Paulo. Associação Brasileira de Cimento Portland, 1995.
- Roy, A; Eaton, H. C.; Cartledge, F. K.; Tittlebaum, M. E. Solidification/stabilization of heavy metal sludge by a Portland cement/fly ash binding mixture hazard. Waste Hazard. Mater. 8, p. 33–39. 1991.
- Rubio, J. Carvão Mineral Caracterização e Beneficiamento, V. 1. Porto Alegre: Nova Linha Artes Gráficas, 240p., 1988.

- Rubio, J.; Souza, M.L.; Smith, R.W. Overview of flotation as a wastewater treatment technique. *Minerals Engineering*, London, v. 15, p.139-155, 2002.
- Sampaio, C. H. Caracterização para o beneficiamento do carvão de Candiota. 1983. Monografia (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1983.
- Sbrighi Neto, C. A importância dos conceitos tecnológicos na seleção de agregados para argamassas e concretos. ANEPAC – Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil. *Revista Areia e Brita* n°12. dez 2000.
- Schackel, B. “The challenges of concrete block paving as a mature technology”, 7th International Conference on Concrete Block Paving, Sun City, South Africa, p. 1-9, 2003.
- Schmidt, T.; Leemann, A.; Gallucci, E.; Scrivener, K. Physical and microstructural aspects of iron sulfide degradation in concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 41, No 3, p. 263-269. 2011.
- Schneider, C. L. Caracterização do beneficiamento de carvão por jigagem no Brasil. 1987. Monografia (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1987.
- Schneider, C. H. Caracterização do Impacto Ambiental e Tratamento da Drenagem Ácida de Minas com Resíduos Alcalinos na Mineração de Carvão de Santa Catarina: Mina Um II Verdinho, Criciúma. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 128p. 2006.
- Sendlein, L. V. A et al. *Surface Mining, Environmental Monitoring and Reclamation Handbook*. New York: Elsevier Ed., 1983. 750p.
- Serafim, M. A. Estudo e proposição de formas de pavers intertravados para áreas e passeios públicos. 2010. Dissertação (Mestrado em Design) – Programa de Pós-Graduação em Design. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Baurú, 2010.
- Shafer, T. J. “A cast history of concrete block pavers at dundalk and seagirt marine terminals”, 8th International Conference on Concrete Block Paving, San Francisco, California, USA, p. 757-766, 2006.
- Si, H.; Bi, H.; Lib, X.; Yang, C. Environmental evaluation for sustainable development of coal mining in Qijiang, Western China. *International Journal of Coal Geology*, Vol. 81, No. 3, p. 163–168. 2009.
- Silva, Z. C. C.; et al. The problem of determination of some South Brazilian coal seams. In: Encontro de pesquisadores em carvão no Rio Grande do Sul, 2., 1990. Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: 1990, p.13-14.
- Skarzynska, K. M. Reuse of Coal Mining Wastes in Civil Engineering – Part 2: Utilization of Minestone. *Waste Management*, vol. 15, No.2, p.83-126. 1995.

- Skousen, J.G. et al. A handbook of technologies for avoidance and remediation of acid mine drainage. West Virginia University and the National Mine Land Reclamation Center, 1998.
- Sminka, D.; Heynen, J. J.M. Re-use of abandoned coal mining waste deposits for the production of construction materials: a case of innovative tendering. Waste Management Series, Vol. 1, p. 814–824. 2000.
- Smith, R. M.; Grube, W. E. Jr.; Arkele, T. Jr.; Sobek, A. A. (1974). Mine spoil potentials for soil and water quality. West Virginia University. EPQ-670/2-74-070.
- Singleton, G. A.; L. M. Lavkulich. Adaption of the Soxhlet Extractor for Pedologic Studies. Soil Science Society of America Journal, Vol. 42, p. 984-986, 1978.
- Soares, P. S. M.; Borma, L. S. (2002). Drenagem ácida e gestão de resíduos sólidos de mineração. Roberto B.E.T. & Olavo B.F. (eds.) Extração de Ouro - Princípios, Tecnologia e Meio Ambiente. Rio de Janeiro, RJ, pp.253-276.
- Soares, P. S. M.; Santos, M. D. C.; Possa, M. V. Carvão brasileiro: tecnologia e meio ambiente. Editoração Eletrônica. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. 300p.
- Soares, P. S. M.; Trindade, R. B. E.; Recuperação ambiental de áreas mineradoras: uma experiência de gestão. XIX ENTMH, Recife, Pernambuco, 2002.
- Sobek, A. A.; Schuller, W. A.; Freeman, J. R.; Smith, R. M. (1978). Field and laboratory methods applicable to overburden and minesoils. US National Technical Information. Report EPA 600/2-78-054, Ohio, 203p.
- Souza, M. S.; Oliveira, I. S. R.; Adeildo, S. C. “Utilização do resídeos de desemborachamento de pistas de aeronaves na produção de blocos de concreto para pavimentação”, 3º Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos - 2º Seminário da Região Nordeste sobre Resíduos Sólidos, João Pessoa, PB, Brasil, Anais, 2010.
- Sun, L.; Huang, Y.; Meng, L. “Development dilemma and path choice of coal worker villages from the perspectives of sustainability”, 6th International Conference on Mining Science & Technology, Xuzhou, China, p. 1777–1782, 2009.
- Tango, C. E. S. Fundamentos de dosagem de concreto para blocos estruturais IPT – São Paulo, 5th International SEMinar on Structural Mansonry for Developing Countries, Florianópolis, Brazil, 1994.
- Tavares, L. M. M. e Sampaio, C. H. Beneficiamento Gravimétrico. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 601p. 2005.
- Tomaru, K., Nakamura, M. “Recycling municipal solid waste into concrete paving blocks”, 9th International Conference on Concrete Block Paving, Buenos Aires, Argentina, p. 1-10, 2009.
- Torres, V. F. N.; Gama, C. D.; Villas-Bôas, R. C. Engenharia ambiental subterrânea e aplicações. 4ª Edição. Rio de Janeiro: CETEM/CYTED, 2005. 550p.
- Twardowska, I; Allen, H. E; Kettrup, A. A. F.; Lacy, W. J. (Editors). Solid Waste: Assessment, Monitoring and Remediation. vol. 220. Amsterdam (Holanda): Elsevier, 2004. p. 1160.
- Tyrrel, W. R.; Mulligan, D.R.; Sly,L.I.; Bell, L. C..Trialing wetlands to treat coal mining wastewaters in low rainfall, high evaporation environment. Water Science Technology. v. 35, n 5, p. 293-299, 1997.

- Vargas, A. S. Estudo da viabilidade do uso do pó de aciaria elétrica a arco na confecção de blocos de concreto para pavimentação. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 148 p., 2002.
- Vigânico, E. M. Produção de sulfato ferroso a partir de rejeitos de carvão. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 70p. 2009.
- Watanabe, F. A.; Nascimento, M. R.; Gemelli, E.; Camargo, N. H. A. “Caracterização de pavimentos de concreto fabricados em equipamentos industriais com a adição de areia de fundição”, 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, Anais, 2006.
- White III, W. W.; Lapakko, K.A.; Cox, 1999, R. L. Static-Test Methods Most Commonly Used to Predict Acid-Mine Drainage: Practical Guidelines for Use and Interpretation. In: G.S. Plumlee and M.J. Logsdon (Eds.), The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, Part A: Processes, Techniques and Health Issues, Reviews in Economic Geology Vol. 6A, Society of Economic Geologists, Inc., 325-356.
- Wilk, C. M. Solidification/Stabilization Treatment and Examples of Use at Port Facilities. In: Ports Conference 2004, Houston, Texas, USA, 2004.

ANEXO A

Resultados dos ensaios de resistência à compressão, resistência à abrasão e absorção de água nos blocos de concreto para pavimentação.

		ordem de execução				
		1°	3°	5°	4°	2°
dm 1 = data da moldagem 1 dm 2 = data da moldagem 2		<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>
		7°	9°	10°	8°	6°
		<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>	<i>o</i>

		resistência à compressão				
		% de substituição				
		0%	25%	50%	75%	100%
7 dias	dm 1	31,0	31,0	22,6*	29,7	28,8
		24,8	28,2	17,7*	30,0	26,0
		28,5	32,2	26,0*	26,0	21,7
	dm 2	17,4*	33,1	35,8	27,0	28,8
		30,0*	36,5	34,0	28,5	26,3
		21,4*	37,1	32,8	28,8	17,1
28 dias	dm 1	40,7	38,3	33,1*	34,0	23,9
		42,0	39,2	29,7*	31,9	30,3
		35,8	38,9	25,1*	34,3	29,7
	dm 2	29,4*	36,2	36,8	30,6	27,9
		19,6*	35,2	34,9	28,5	29,1
		19,9*	37,7	38,0	27,9	23,0
90 dias	dm 1	40,4	28,5	33,7*	32,2	27,6
		40,7	33,7	36,2*	25,4	20,2
		41,0	34,9	18,6*	32,5	23,0
	dm 2	27,6*	43,8	28,5	31,6	28,8
		27,6*	36,5	36,5	28,5	31,2
		25,4*	39,8	37,4	23,6	32,5

		resistência à abrasão				
		% de substituição				
		0%	25%	50%	75%	100%
28 dias	dm 1	9,3	8,2	10,1*	8,6	10,4
	dm 2	13,1*	10,5	9,4	9,0	10,6
90 dias	dm 1	6,6	8,4	8,2*	8,5	9,3
	dm 2	7,0*	6,6	7,9	7,8	13,6

		absorção de água				
		% de substituição				
		0%	25%	50%	75%	100%
28 dias	dm 1	4,9	5,3	6,2*	6,4	7,5
	dm 2	6,6*	5,4	5,4	7,3	8,6

*Dados que não foram utilizados devido a problemas durante a produção dos blocos de concreto. Isso ocorreu nas moldagens do concreto referência (segunda data) e 50% (primeira data). No lugar desses valores utilizou-se os valores obtidos na outra data de moldagem.