

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS E CONSTRUÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**UTILIZAÇÃO DO REJEITO DE SINTER FEED
COMO AGREGADO NA PRODUÇÃO DE PEÇAS
DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO**

Ayrton Vianna Costa

**Belo Horizonte
2009**

Ayrton Vianna Costa

UTILIZAÇÃO DO REJEITO DE SINTER FEED COMO AGREGADO NA PRODUÇÃO DE PEÇAS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Área de concentração: Materiais de Construção Civil

Linha de pesquisa: Resíduos como Materiais de Construção Civil

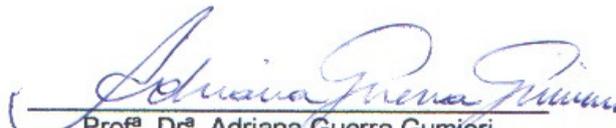
Orientadora: Prof^a. Dr^a. Adriana Guerra Gumieri

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2009

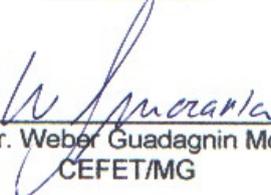


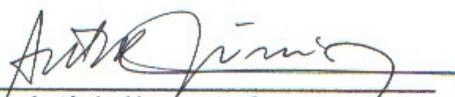
Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Construção Civil

Dissertação intitulada "Utilização do rejeito de sinter feed como agregado na produção de peças de concreto para pavimentação", de autoria do mestrando Ayrtton Vianna Costa, aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:


Prof.^a. Dr.^a. Adriana Guerra Gumiéri
DEMC/UFMG – (Orientadora)


Prof. Dr. Abdias Magalhães Gomes
DEMC/UFMG


Prof. Dr. Weber Guadagnin Moravia
CEFET/MG


Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Construção Civil
EE/UFMG

Belo Horizonte, 21 de outubro de 2009.

**A Deus,
à minha Mãe, à Marise e aos meus Filhos.**

AGRADECIMENTOS

Poder agradecer o bem recebido é um ato extremamente gratificante em todos os sentidos.

A quem se agradece, na realidade presta-se uma deferência, é uma homenagem ao seu espírito colaborador, ao seu interesse e desprendimento em ter-se doado, seja em ação, material ou conhecimento.

O agradecido, por sua vez, manifesta de forma ampla, sincera e transparente o seu reconhecimento, satisfação e conforto pelo atendimento e auxílio recebidos.

É um momento, enfim, em que as pessoas se irmanam e crescem pelo prazer da solidariedade.

Neste momento marcante de minha vida tenho muitos agradecimentos a fazer, mas gostaria de destacar, entre outros:

Ao Prof. Abdias, que me convidou, estimulou e abriu as portas do DEMC para que eu trilhasse este caminho.

A Prof^a. Adriana pelo seu interesse, incentivo, motivação e orientação a mim dedicados, tão indispensáveis à elaboração e desenvolvimento deste trabalho.

Aos Profs. José Márcio, Wander Luiz, Adriano de Paula, Maria Teresa, Francisco Carlos e Antônio Júnior, por suas doações e interesses na transferência do conhecimento.

Aos Profs. Cícero Murta, Paulo Andery, Maria Carmem e Dalmo Lúcio por seus espíritos de camaradagem e amizade demonstrados ao longo desta caminhada.

A ITAMINAS Comércio de Minérios S.A. e HOLCIM Brasil S.A., empresas que forneceram os materiais para a pesquisa e patrocinaram algumas de suas etapas.

Ao CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, entidade que colaborou na execução de alguns ensaios em seus laboratórios.

A DIEFRA Engenharia e Consultoria Ltda., empresa do estimado colega Dirceu Krollman, que muito me auxiliou no desenvolvimento de vários ensaios físicos.

A IBEC - Artefatos de Concreto, empresa que se interessou pelo tema, disponibilizando suas instalações industriais para a produção e ensaios das peças de concreto produzidas na pesquisa.

Aos colegas e colaboradores aqui não citados, mas dos quais não me esqueci.

E por fim, à Escola de Engenharia da UFMG, através do seu Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, pelo Curso de Mestrado que me proporcionou e as demais atividades correlatas na produção deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho versa sobre os estudos e a viabilidade técnica e conveniência ecológica do aproveitamento e emprego do rejeito de *sinter feed*, oriundo de atividades mineradoras de ferro, como agregado na produção do concreto para a fabricação de elementos pré-fabricados destinados à pavimentação. Em virtude da restrita bibliografia a respeito do assunto, a pesquisa foi desenvolvida com base no conhecimento dos agregados tradicionais e de algumas poucas experiências práticas do uso de rejeito conhecidas nesta área e, principalmente, embasada em análises químicas e ensaios físicos do rejeito em questão, bem como na performance das peças de concreto produzidas. Por esse motivo, o tema é inédito. Foi realizada, inicialmente, ampla gama de ensaios físicos e químicos do rejeito, constituindo a etapa de caracterização do rejeito objeto da pesquisa, que foi concluída com o ensaio de resistência à compressão simples de argamassa utilizando esse rejeito. Posteriormente, na etapa de produção dos pré-moldados para piso intertravado, foram confeccionadas peças em linha de produção de uma indústria de pré-moldados e submetidas aos ensaios estabelecidos na normalização brasileira. Em ambas as etapas, os resultados obtidos apresentaram-se bastante satisfatórios, comprovando os objetivos da pesquisa. A maior relevância do uso do rejeito de *sinter feed* como agregado na produção de peças de concreto empregadas em pavimentação se refere ao desenvolvimento sustentável da indústria da construção civil. Pelo lado das indústrias mineradoras, o descarte desse rejeito de maneira produtiva significa grande relação custo-benefício que se caracterizará pela ausência tanto das pilhas em suas áreas quanto pela ausência de custo com sua operacionalização.

Palavras-chave: Mineração. Rejeito. Sinter feed. Pavimentação. Piso intertravado de concreto.

ABSTRACT

This work deals with sinter feed tailing studies and technical and ecological convenience employment and exploitation feasibility proceeding of iron ore activities, as an aggregate in the concrete production to the pavement precast elements manufacture. As a result of the theme's restricted bibliography, the search was developed based on the traditional aggregates knowledge and in a few tailing usage practical experiences known in this area and, mainly, based on the referred tailing chemical analyses and physical tests in the specific parts produced performance. Due to this boarding, the theme is unprecedented. Initially, it was performed tailing physical and chemical wide range tests, constituting the tailing characterization research step, which has been completed with the mortar simple compressive strength test. Later, in the small concrete block production step, parts were made at an industry process line and subjected to Brazilian standardized precast tests. In both steps, results were quite satisfactory, proving the research objectives. The best relevance of using the sinter feed tailing as an aggregate in producing concrete pavement parts is related to the construction industry sustainable development. By the side of mining industries, the productively way of that tailing disposition means large cost-benefit relationship characterized as the absence of piles in their areas as their operational cost absence

Keywords: Mining. Tailing. Sinter feed. Pavement. Interlocked concrete pavement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vista dos bloquetes produzidos no Cond. Quintas de Casa Branca	21
Figura 2 – Detalhe da superfície dos referidos bloquetes	22
Figura 3 – A idéia de consiliência.....	30
Figura 4 – Fluxograma básico do processo de mineração de ferro.....	34
Figura 5 – Detalhe do rejeito de sinter feed estocado em pilhas.....	37
Figura 6 – Detalhe do rejeito de sinter feed com referência de dimensão	37
Figura 7 – Vista geral das áreas de estoque do rejeito de sinter feed.....	39
Figura 8 – Vista da dimensão de uma das pilhas de estoque (rejeito de sinter feed)	39
Figura 9 – Detalhe de coloração do bloquete convencional e de bloquete com rejeito	41
Figura 10 – Instalação de peneiramento para produção do Pavieco	43
Figura 11 – Vista dos primeiros tipos de Pavieco produzidos	43
Figura 12 – Detalhe de área da pavimentação no bairro Jd. Canadá	44
Figura 13 – Vista da área de produção montada para o Pavieco.....	44
Figura 14 – Vista por satélite de área de exploração de areia de barranco	52
Figura 15 – Vista local de área degradada após exploração de areia.....	52
Figura 16 – Vista local de área degradada após exploração de areia.....	52
Figura 17 – Fluxograma típico de pedreiras.....	54
Figura 18 – Limites granulométricos para agregado graúdo	55
Figura 19 – Limites granulométricos para agregado miúdo	55
Figura 20 – Análise econômica de alternativas de pavimentação.....	64
Figura 21 – Composição do custo rodoviário total, segundo o Banco Mundial	65
Figura 22 – Malha rodoviária brasileira	66
Figura 23 – Vista de algumas peças convencionais do Paver 8	71
Figura 24 – Vista da vibro-prensa Trillor	75
Figura 25 – Vista das giricas utilizadas como unidade de medida na indústria.....	80
Figura 26 – Momento da saída dos bloquetes na vibro-prensa.....	82
Figura 27 – Sequência de bandejas de bloquetes na saída da vibro-prensa.....	82
Figura 28 – Gaveteiro com bandejas de bloquetes recém produzidos.....	83
Figura 29 – Sequência de gaveteiros em repouso por 24 horas.....	83

Figura 30 – Vista de uma das câmaras úmidas da empresa	84
Figura 31 – Vista de área externa de cura de bloquetes paletizados.....	84
Figura 32 – Vista parcial das instalações do laboratório da indústria.....	85
Figura 33 – Vista da área do laboratório da IBEC	86
Figura 34 – Vista da estufa elétrica utilizada na secagem das peças	87
Figura 35 – Vista do aparelho de ensaio de desgaste por abrasão	88
Figura 36 – Difratoograma obtido do ensaio de Difractometria de Raios-X de amostra do rejeito	100
Figura 37 – Detalhe da seção de um corpo de prova 5 x 10 cm da argamassa produzida com o rejeito de sinter feed	101
Figura 38 – Detalhe da lâmina montada e das duas seções polidas preparadas ...	102
Figura 39 – Fragmentos de argamassa normal e argamassa com rejeito para o ensaio de MEV.....	103
Figura 40 – Aparelho de Microscopia de Varredura Eletrônica	104
Figura 41 – Argamassa com areia comum e argamassa com rejeito de sinter feed: 25x	104
Figura 42 – Argamassa com areia comum e argamassa com rejeito de sinter feed: 200x	105
Figura 43 – Argamassa com areia comum e argamassa com rejeito de sinter feed: 5.000x	105
Figura 44 – Argamassa com areia comum e argamassa com rejeito de sinter feed: 20.000x	105
Figura 45 – Ponto do EDS – argamassa normal e Ponto do EDS – argamassa com rejeito	106
Figura 46 – Detalhe da formação de cristais de etringita no interior de um poro do agregado rejeito: 2.000x	106
Figura 47 – Vista de uma zona de transição agregado/matriz na argamassa com rejeito: 500x.....	106
Figura 48 – Visão ampliada da área destacada da mesma zona de transição anterior: 3000x.....	107
Figura 49 – Plotagem dos índices do ensaio de reatividade álcali-agregado no gráfico respectivo.....	110

Figura 50 – Vista de trecho do bairro Jd. Canadá em Nova Lima pavimentado com bloquetes produzidos com material semelhante ao da presente pesquisa.....	135
Figura 51 – Vista de trecho do bairro Jd. Canadá em Nova Lima pavimentado com bloquetes produzidos com material semelhante ao da presente pesquisa.....	136

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características de rejeitos	35
Quadro 2 – Influência da granulometria da areia nas propriedades da argamassa ..	49
Quadro 3 – Comparação entre piso de concreto e piso de asfalto.....	59
Quadro 4 – Economia de Energia Elétrica	62
Quadro 5 – Menor distância de frenagem	62
Quadro 6 - Economia estimada de combustíveis em trecho rodoviário de concreto x trecho de asfalto, para tráfego médio diário de 25.000 veículos.....	63
Quadro 7 – A história dos pavimentos asfáltico e de concreto.....	63
Quadro 8 – Comparação entre tipos de pavimentação	69
Quadro 9 – Caracterização do agregado miúdo - Areia.....	77
Quadro 10 – Caracterização do Pó de Pedra.....	78
Quadro 11 – Caracterização do agregado graúdo - Brita.....	79
Quadro 12 – Mescla granulométrica dos agregados utilizados na produção do bloquete IBEC.....	81
Quadro 13 – Resultados de resistência à compressão dos bloquetes de referência da IBEC.....	89
Quadro 14 – Resultados de absorção dos bloquetes de referência da IBEC.....	90
Quadro 15 – Resultado do desgaste por abrasão dos bloquetes de referência da IBEC.....	91
Quadro 16 – Comparativo de mescla granulométrica considerando 100% do rejeito de sinter feed.....	93
Quadro 17 – Comparativo de mescla considerando 75% do rejeito de sinter feed ...	94
Quadro 18 – Comparativo de mescla considerando 75% do rejeito de sinter feed + 25% brita 0.....	95
Quadro 19 – Comparativo de mescla considerando 75% do rejeito de sinter feed + 25% areia.....	96
Quadro 20 – Comparativo de mescla considerando 50% do rejeito de sinter feed + 50% areia.....	97
Quadro 21 – Comparativo de mescla considerando 50% do rejeito de sinter feed ...	98
Quadro 22 – Resultado dos ensaios de granulometria da areia e do rejeito	115

Quadro 23 – Resultado de ensaio comparativo de resistência à compressão em argamassas de areia e rejeito	118
Quadro 24 – Resultados de ensaio das amostras do Traço 1 – Resistência à compressão	120
Quadro 25 – Resultados de ensaio das amostras do Traço 2 – Resistência à compressão	121
Quadro 26 – Resultados de ensaio das amostras do Traço 3 – Resistência à compressão	122
Quadro 27 – Resultados de ensaio das amostras do Traço 1 – Absorção de água	123
Quadro 28 – Resultados de ensaio das amostras do Traço 2 – Absorção de água	124
Quadro 29 – Resultados de ensaio das amostras do Traço 3 – Absorção de água	125
Quadro 30 – Resultados de ensaio das amostras do Traço 1 – Ensaio de abrasão	126
Quadro 31 – Resultados de ensaio das amostras do Traço 2 – Ensaio de abrasão	127
Quadro 32 – Resultados de ensaio das amostras do Traço 3 – Ensaio de abrasão	128
Quadro 33 – Resumo dos resultados dos traços da pesquisa com o traço de referência – Resistência à compressão	130
Quadro 34 – Resumo dos resultados dos traços da pesquisa com o traço de referência – Absorção de água	131
Quadro 35 – Resumo dos resultados dos traços da pesquisa com o traço de referência – Desgaste por abrasão	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultado dos ensaios de granulometria realizados pelo laboratório da Itaminas	38
Tabela 2 – Resultado de ensaios químicos realizados no laboratório da Itaminas	40
Tabela 3 – Mesclas Estudadas	92
Tabela 4 – Resultado da análise de microscopia ótica nas amostras de argamassa com o rejeito	102
Tabela 5 – Análise química qualitativa semiquantitativa, através do EDS, no ponto destacado da Fig. 43 – imagem esquerda – argamassa com areia normal	107
Tabela 6 – Análise química qualitativa e semiquantitativa através do EDS, em ponto não marcado da Fig. 43 – imagem direita – argamassa com rejeito de sinter feed	107
Tabela 7 – Resultado dos ensaios de solubilização das amostras A e B e respectivos limites	108
Tabela 8 – Resultado dos ensaios de lixiviação das amostras C e respectivos limites	109
Tabela 9 – Resultado do ensaio de reatividade álcali-agregado.....	109
Tabela 10 – Resultado do ensaio de resistência a sulfatos	111
Tabela 11 – Resultado da determinação da massa específica do rejeito	111
Tabela 12 – Resultado da determinação da massa unitária do rejeito.....	112
Tabela 13 – Resultado da determinação do teor de argila em torrões do rejeito...	112
Tabela 14 – Resultado da determinação do teor de materiais pulverulentos do rejeito	113
Tabela 15 – Resultado da determinação de impurezas orgânicas do rejeito	113

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana para Testes e Materiais)
CETEC	Centro Tecnológico de Minas Gerais
COV	Custo Operacional dos Veículos
CP II-E-32	Cimento Portland tipo II – Composto com Escória – 32 MPa
CP V-ARI	Cimento Portland tipo V - Alta Resistência Inicial
CVRD	Companhia Vale do Rio Doce
DEMC	Departamento de Engenharia de Materiais e Construção
DEMET	Departamento de Engenharia Metalúrgica
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
EDS	Espectrômetria de Energia Dispersiva
EE	Escola de Engenharia
EN	Norma Européia
HDM-4	<i>Highway Development and Management Tools</i> (Ferramentas de Gestão e Desenvolvimento de Autoestradas)
IBEC	Insumos Básicos e Especiais para Construção Civil
IRI	<i>International Roughness Index</i> (Índice de Irregularidade Internacional)
ITM	Itaminas
MBR	Minerações Brasileiras Reunidas
ME	Método de Ensaio
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MG	Minas Gerais
NBR	Norma Brasileira Registrada
QF	Quadrilátero Ferrífero
S.A.	Sociedade Anônima
TSD	<i>Technology for Sustainable Development</i> (Tecnologia para Desenvolvimento Sustentável)
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

Símbolos

t	Coeficiente de Student
s	Desvio padrão
a	Índice de absorção de água
d	Índice de desgaste por abrasão
m_i	Massa de índice i
m_2	Massa do corpo de prova saturado
m_1	Massa do corpo de prova seco
m_0	Massa inicial
n	Número de amostras
f_{pi}	Resistência à compressão individual
f_{pk}	Resistência característica à compressão

f_p	Resistência média à compressão
\geq	Maior ou igual
\approx	Aproximadamente
\leq	Menor ou igual
Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
C ₂ S	Silicato dicálcico
C ₃ A	Aluminato tricálcico
C ₃ S	Silicatos tricálcico
Ca	Cálcio
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
C ₄ AF	Ferroaluminato tetracálcico
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
Fe	Ferro
K	Potássio
Mn	Manganês
Ø	diâmetro
O	Oxigênio
P	Fósforo
p.p.m.	Partes por milhão
ppc	Perda ao fogo
Ra	Redução de Alcalinidade
S	Enxofre
Sd	Sílica Dissolvida
Si	Silício
SiO ₂	Óxido de Silício

Abreviaturas

Acum.	acumulado (a)
ARG.	argila
Argam.	argamassa
c/	com
Caract.	característica
COEF.	coeficiente
Com.	Comércio
Concr.	concreto
CP	corpo de prova
cp's	corpos de prova
Dif.	diferença
etc.	etcétera
IMP.	impureza
Ind.	Indústria
inic.	inicial
intertr.	intertravado
Ltda.	limitada
MAT.	material
max.	Máximo
MÓD.	módulo
Pen.	peneira

RCS	resistência à compressão simples
Refer.	referência
Resist.	resistência
Result.	resultado
Sat.	saturado
Sup.	superfície

LISTA DE UNIDADES

$\mu\text{g/l}$	micrograma por litro
bar	unidade de pressão igual $1,02 \text{ kgf/cm}^2$
cm	centímetro
dm	decímetro
dm^3/kg	decímetro cúbico por quilograma
g	grama
g/cm^3	grama por centímetro cúbico
kg	kilograma
kg/cm^3	kilograma por centímetro cúbico
m	metro
m^3/dia	metro cúbico por dia
mg/l	miligrama por litro
milimoles/l	milimoles por litro
mm	milímetro
MPa	megaPascal
t/dia	tonelada por dia
t/mês	tonelada por mês

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	19
1.1 – Objetivos	20
1.2 – Justificativa	21
1.3 – Estrutura da pesquisa	23
1.4 – Limitações da pesquisa.....	25
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
2.1 – Desenvolvimento Sustentável e Aproveitamento de Resíduos.....	27
2.2 – A Mineração de Ferro e seus Rejeitos	31
2.2.1 – O rejeito de <i>sinter feed</i> na Mina de Jangada	36
2.2.1.1 – Alternativas para utilização do rejeito de <i>sinter feed</i>	40
2.3 – Os Agregados para Concreto	45
2.3.1 – A Areia Natural e sua Exploração	51
2.3.2 – As Britas.....	53
2.4 – A Pavimentação e o Pavimento pré-fabricado de concreto	57
3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL	70
3.1 – Etapas da Pesquisa	70
3.2 – Metodologia	71
3.2.1 – Primeira etapa.....	72
3.2.2 – Segunda etapa.....	74
3.3 – Informações e parâmetros de referência da produção corrente da
empresa de fabricação dos bloquetes de concreto (IBEC)	
da IBEC	75
3.4 – A produção de peças com o rejeito de Sinter Feed	92
4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	98
4.1 – Primeira Etapa – caracterização do rejeito	100
4.1.1 - Difração de Raio-X	100
4.1.2 – Análise de microscopia ótica	101
4.1.3 – Ensaio de microscopia eletrônica de varredura	103
4.1.4 – Ensaio de caracterização ambiental	108
4.1.5 – Ensaio de reatividade álcali-agregado	109
4.1.6 – Ensaio de durabilidade do agregado de resistência a sulfatos..	111
4.1.7 – Determinação da massa específica.....	111
4.1.8 – Determinação da massa unitária	112
4.1.9 – Ensaio de determinação do teor de argila em torrões	112
4.1.10 –Determinação do teor de materiais pulverulentos	113
4.1.11– Determinação de impurezas orgânicas	113
4.1.12 –Ensaio de granulometria.....	114
4.1.13 –Ensaio de qualidade do agregado miúdo / comparativo de	
resistência.....	116
4.2 – Segunda Etapa – produção dos bloquetes	119
5 – CONCLUSÕES.....	135

6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	137
---	------------

REFERÊNCIAS.....	139
-------------------------	------------

ANEXOS

Anexo 1 – Certificado de Mineralogia e Difração de Raios-X.....	144
Anexo 2 – Ficha de Descrição Petrográfica do rejeito.....	145
Anexo 3 – Análises químicas qualitativas (EDS).....	146
Anexo 4 – Análises químicas qualitativas (EDS).....	147
Anexo 5 – Certificado de ensaio de difratometria de raios-x	148
Anexo 6 – Certificado de ensaio de durabilidade do agregado	150
Anexo 7 – Certificado de ensaio de reatividade potencial.....	152
Anexo 8 – Certificado de ensaio de solubilização e lixiviação.....	153

1 – INTRODUÇÃO

A busca por uma destinação útil aos resíduos e rejeitos oriundos da produção de indústrias siderúrgicas e mineradoras tem sido uma preocupação constante por parte das empresas que se dedicam a estas atividades, de ambientalistas, bem como órgãos de controle e instituições de pesquisas interessados na preservação do meio ambiente.

Assim é, por exemplo, que se conhece na área da siderurgia o grande avanço estabelecido com o aproveitamento de determinadas escórias como componentes importantes para produção de alguns tipos de cimentos Portland, contribuindo para significativas economias em sua produção, melhoria de suas características e, principalmente, para a utilização inteligente de resíduos gerados de vários tipos de indústrias siderúrgicas.

Também na área da mineração de calcário e gnaiss, aquilo que um dia foi rejeito na produção das britas para emprego nos concretos, hoje, graças a pequeno investimento e estabelecimento de mais uma fase de beneficiamento das frações finas da britagem, produz-se com crescente aceitação pelo mercado as areias artificiais. As areias calcáreas, por exemplo, com o seu emprego substituindo parte das areias naturais provenientes dos rios, incorpora significativas melhorias nas propriedades dos concretos e argamassas, ao mesmo tempo que estabelece também uma desejável economia no consumo deste bem natural, finito e não renovável.

O Brasil é o sexto país detentor de maiores quantidades de minério de ferro, com quase 7% das reservas mundiais (QUARESMA, 2001) e o segundo maior produtor de minério de ferro. Em 2007, o país produziu 350 milhões de toneladas, equivalentes a 18,42% da produção mundial, que é de 1,9 bilhões de toneladas. (IBRAM, 2008). O alto teor de ferro contido nos minérios brasileiros (60 a 67% nas hematitas e 50 a 60% nos itabiritos) leva o Brasil a ocupar lugar de destaque no cenário mundial, em termos de ferro contido no minério. O estado de Minas Gerais é responsável por mais de 86% dessas reservas, notabilizando-se pela grande

quantidade de plantas de mineração, especialmente as de ferro, espalhadas pela região (QUARESMA, 2001).

O minério de ferro é utilizado na indústria siderúrgica (99%) e o restante é utilizado como carga na indústria de ferro-liga, cimento e construção de estradas. Sua utilização pode ser feita por minérios granulados e aglomerados (sinter ou pelota). Os granulados (6 a 25 mm) são adicionados diretamente nos fornos de redução, enquanto que os aglomerados são os minérios mais finos. Os principais processos de aglomeração são sinterização e pelletização. Na sinterização são obtidos minérios sinter-feed (0,15 a 6,35 mm) e na pelletização são obtidos minérios pellet-feed (menor que 0,15mm). O minério de ferro com teores médios de 65% de ferro, sílica e alumínio em torno de 3% cada e baixo teor de fósforo, é utilizado nos alto-fornos para a produção de ferro gusa e nos fornos de redução direta para produção de ferro-esponja. O sinter-feed é destinado às usinas siderúrgicas integradas de aço. (QUARESMA, 2001).

O rejeito de sinter-feed é um resíduo do processo de produção do minério de ferro que, até o momento, não tem nenhum direcionamento comercial. Durante o processo de produção do minério de ferro, o material é submetido a operações de lavagem e peneiramento, gerando um rejeito sem contaminantes e com razoável regularidade granulométrica. Esse material contém, ainda, uma significativa quantidade de ferro, cuja separação não é possível apenas pelo processo de separação magnética. O rejeito vem sendo depositado, ao longo dos anos, em enormes pilhas junto às áreas de mineração, causando danos ao meio ambiente e exigindo uma demanda de custos relativos à sua disposição e controle ambiental.

1.1 – Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a utilização do rejeito de *sinter feed* como agregado na produção de peças de concreto empregadas em pavimentação.

Os objetivos específicos são:

- Caracterização química, física e ambiental do rejeito;
- Caracterização do rejeito visando o uso como agregado para o concreto;

- Avaliação das propriedades mecânicas e do desempenho de peças pré-fabricadas para pavimentação.

1.2 – Justificativa

Há cerca de cinco anos atrás, o Condomínio Quintas de Casa Branca, situado na localidade que lhe deu o nome, município de Brumadinho/MG, desenvolveu de forma aleatória uma experiência de utilização do rejeito de *sinter feed*, como agregado miúdo na produção do concreto destinado a produção de bloquetes para a sua pavimentação interna. O material foi objeto de doação por parte da empresa Itaminas, que exerce atividades mineradoras junto a MBR, no vizinho município de Sarzedo.

Foram produzidos e aplicados alguns poucos mil metros quadrados de elementos pré-fabricados de concreto, constituindo um pavimento intertravado, mas que, pela falta de melhor avaliação e embasamento científico e tecnológico quanto ao material utilizado, aliada também à falta de um ajustamento adequado da produção, redundou em peças de qualidade inadequada e de baixo desempenho.

As Figuras 1 e 2 ilustram o resultado desta experiência: concreto apresentando mescla granulométrica inadequada, peças com adensamento inconveniente e textura superficial muito aberta, porosa e irregular.



Figura 1 – Vista dos bloquetes produzidos no Cond. Quintas de Casa Branca



Figura 2 – Detalhe da superfície dos referidos bloquetes

Conseqüência direta da situação descrita, as peças produzidas apresentaram resistência média à ruptura por compressão $f_p = 8,3$ MPa, bem inferior aos valores estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT – NBR 9781), e índice de absorção de água médio $a = 7,1\%$, um tanto elevado, tendo em vista o que prescreve a Norma Européia (EN - 1338) que limita em 6%. Práticas americanas e canadenses estabelecem uma aceitação individual $\leq 7\%$ desde que a média seja $\leq 5\%$. A normalização brasileira não estabelece limites nesse particular. Estes resultados caracterizaram um aceno importante quanto ao comprometimento da performance e durabilidade daquelas peças.

Diante desses resultados, a produção dos bloquetes foi suspensa e, posteriormente retomada, porém com todos os materiais de uso convencional, a despeito de seus custos de obtenção mais elevados.

O insucesso experimentado nos trabalhos de pavimentação do Condomínio Quintas de Casa Branca foi, na realidade, o embrião das idéias e do interesse no estudo mais consistente e detalhado acerca desse material.

A grande quantidade gerada deste rejeito, estocada em grandes áreas do sítio da mineração, aliada ao favorável aspecto tátil/visual do material, de satisfatória regularidade granulométrica, aparentemente, sem contaminantes, e principalmente, sem uma destinação ao menos vislumbrada pela mineradora, despertou o interesse e a convicção de um possível aproveitamento.

Outro aspecto observado, se não inédito, foi o fato de não ter-se identificado, na ampla busca realizada por estudos, publicações, bem como em entidades de registro tecnológico/científico, referências ou pesquisas no sentido do presente trabalho, o que estimulou sobremaneira seu desenvolvimento.

Em se tratando de um resíduo, a sua utilização como matéria prima, certamente apresentaria vantagens relativas ao seu custo, já que poderia constituir-se em solução para um dos problemas ambientais e encargos enfrentados pelas empresas de mineração no desenvolvimento de suas atividades, reduzindo-lhes custos operacionais na gestão de seus rejeitos, ao mesmo tempo em que lhes agregando alguma receita. Por outro lado, semelhantemente ao surgimento das areias artificiais originadas do beneficiamento dos resíduos da britagem dos calcários e gnaisses, o aproveitamento desse resíduo viria a se constituir, também, em mais uma e excelente alternativa para substituição das areias naturais nas áreas de sua aplicabilidade, contribuindo para a minoração dos impactos ambientais nos sítios de mineração.

Já quanto à substituição das areias naturais, um bem finito e cada vez mais escasso no entorno das grandes cidades, a possibilidade de redução na sua demanda com implicação direta na redução das áreas de sua exploração, contribuindo, conseqüentemente, na minoração da degradação da natureza, se constituiria em ação e tecnologia perfeitamente alinhadas ao conceito de sustentabilidade

1.3 – Estrutura da pesquisa

Numa consideração relativa ao planejamento e apresentação da pesquisa, o presente trabalho foi composto e desenvolvido em 6 (seis) capítulos:

Na Introdução, são apresentadas as considerações e abordagens mais gerais, constando dos embasamentos iniciais da pesquisa, a motivação para o desenvolvimento do tema, seus objetivos, limitações, bem como os conceitos e fundamentos que estabeleceram a procedência e conveniência do seu desenvolvimento.

A Revisão da Literatura estabelece uma abordagem a respeito da temática de desenvolvimento sustentável e a atualíssima e crescente preocupação e

necessidade da gestão e aproveitamento de resíduos e rejeitos em nosso ambiente, especificamente na aplicação para concretos. É estabelecida contextualização da mineração de ferro e seus rejeitos, é apresentada uma abordagem geral do tema central deste trabalho, considerando o rejeito de *sinter feed*, o sítio minerário escolhido como gerador do rejeito, dados de sua produção e outras considerações pertinentes para este trabalho. São apresentadas características dos agregados para concreto e a sua exploração na natureza. Por fim, encerrando o capítulo, um breve retrospecto relativo às atividades de pavimentação e, especificamente, quanto ao pavimento composto por elementos pré-fabricados de concreto.

No capítulo terceiro, Programa Experimental, são descritas as etapas do trabalho, é estabelecida a metodologia, com o planejamento conceitual e operacional concebido para o desenvolvimento da pesquisa (duas etapas), compativelmente com as limitações de caráter operacional. Ainda neste capítulo são apresentadas as informações e os parâmetros que estabeleceram e caracterizaram os materiais e as peças, cujos resultados dos ensaios foram tomados como referência para o trabalho.

O capítulo quarto trata dos Resultados e Discussão, em que são apresentados em detalhes os resultados dos diversos ensaios realizados nas duas etapas da pesquisa, em amostras do rejeito e peças produzidas com o mesmo, bem como as considerações sobre os valores obtidos.

Finalizando o estudo, nos capítulos quinto e sexto, constam as Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros, que incluem procedimentos viáveis que poderão ser implementados para o estabelecimento e fortalecimento do mercado para o novo insumo.

Os trabalhos foram desenvolvidos com o suporte da estrutura abaixo citada, sem a qual o estudo seria inviabilizado:

- (1) Fornecedora do rejeito: ITAMINAS Comércio de Minérios S.A., proveniente da Mina de Jangada, em Sarzedo / Minas Gerais;
- (2) Fornecedor do cimento: HOLCIM Brasil S.A., proveniente da sua unidade em Pedro Leopoldo / Minas Gerais;
- (3) Laboratório de análises físico-químicas: CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, em Belo Horizonte / Minas Gerais;

- (4) Laboratório de análises microscópicas: EE.UFMG / DEMET, em Belo Horizonte / Minas Gerais;
- (5) Laboratório de análises físicas: EE.UFMG / DEMC, DIEFRA Engenharia e Consultoria Ltda. e IBEC - Artefatos de Concreto, respectivamente, em Belo Horizonte e Matozinhos / Minas Gerais;
- (6) Laboratório de análises químicas: SOLOCAP Geotecnologia Rodoviária e LABORATÓRIO MINIMAX Ltda., em Belo Horizonte / Minas Gerais;
- (7) Fabricação de peças em linha de produção: IBEC - Artefatos de Concreto, em Matozinhos / Minas Gerais.

1.4 – Limitações da pesquisa

O estudo apresentou limitações de ordem programática, em função dos objetivos a que se propôs como também limitações impositivas, devido a circunstâncias a que o autor teve que se submeter em função de disponibilidades e/ou conveniências operacionais.

Quanto às limitações programáticas, tendo por base o objetivo principal da pesquisa, teve-se como norte e interesse não estender, além do necessário, os ensaios, especialmente os da etapa de produção dos bloquetes, sendo então estabelecido:

- Dentre os modelos disponíveis comercialmente para a produção dos elementos, escolheu-se o bloquete Paver;
- Dentre as alturas de Paver disponíveis, 6, 8 e 10 cm, definiu-se pelo de altura intermediária, sendo adotado o Paver 8;
- Quanto aos possíveis traços de concreto a serem utilizados, definiu-se apenas pela substituição (parcial ou total) dos agregados convencionais utilizados na indústria pelo rejeito em estudo, mantendo-se inalterados os demais parâmetros da produção corrente da fábrica;
- Os ensaios de desempenho da segunda etapa da pesquisa (produção dos bloquetes) foram realizados tendo as peças da produção corrente como referência na comparação com as peças produzidas com o emprego do rejeito;
- A conclusão sobre a viabilidade técnica do emprego se deu a partir da análise dos resultados dos ensaios da primeira etapa da pesquisa, etapa de

caracterização do rejeito, constituída pelos ensaios físicos, químicos e ambientais do material, e dos desvios observados nos resultados dos ensaios de desempenho, da segunda etapa;

- Não constituiu objeto da pesquisa amplo estudo de traços de concreto, o que seria viável e recomendável apenas para o caso de se estabelecer uma otimização tecnológica e de custos para a produção corrente com o rejeito estudado.

Quanto às limitações impositivas podem ser citadas:

- A produção da indústria se deu com a medição dos agregados em volume, tendo como unidade de medição o conteúdo de uma girica tradicional. Isto inviabilizou, dentro da rotina de produção da fábrica, o refinamento da mescla granulométrica da mistura testada, quando da substituição parcial pelo rejeito, na busca daquela que mais se aproximasse da mescla apresentada pela proporção corrente com os materiais convencionais;
- A rotina de produção da fábrica estabeleceu também restrições de disponibilidade na introdução das atividades da pesquisa no dia-a-dia industrial. As atividades da pesquisa na empresa tiveram que ser agendadas em horários e períodos curtos, de forma a não prejudicar o andamento/produção da fábrica de peças pré-fabricadas de concreto;
- Pela indisponibilidade do aparelho do pêndulo britânico, não foram realizados ensaios de resistência ao escorregamento com esse equipamento, embora não seja requerido pela NBR 9781, mas que possui indicação em norma internacional, a ASTM-E 303-93.

Em virtude do ineditismo deste estudo, demos maior importância à metodologia empregada e a seus resultados, esperando que as trinta e poucas páginas da revisão da literatura possam gerar subsídios para a compreensão do que se pretendeu defender.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Desenvolvimento Sustentável e Aproveitamento de Resíduos

Concreto, como material de construção, foi importante no passado, é bastante útil atualmente, e tende a ser indispensável no futuro¹. Com estas palavras, Kesler (1980) antevia a realidade contemporânea.

Corroborando o entendimento, Mehta e Monteiro (2006) afirmam que as aplicações científicas dos princípios de materiais em relação à tecnologia da produção de concreto oferecem a esperança de que, no futuro, o produto disponível para construções em geral serão consideravelmente superiores em durabilidade e sustentabilidade do que as usadas atualmente².

E isso se deve ao fato de que mudanças são inevitáveis, mas a rapidez das mudanças causa a percepção de que os modos correntes da economia e do desenvolvimento industrial são insustentáveis. O crescimento populacional, a urbanização, as escolhas tecnológicas e seu impacto ao meio ambiente encontram-se, inquestionavelmente, entre as forças chave que mobilizam o mundo contemporâneo (MEHTA, 1994).

Do ponto de vista do desenvolvimento industrial, o planeta pode ser dividido em duas partes: aquela em que o processo de industrialização e urbanização começou há mais de 100 anos e aquela em que isso foi iniciado, essencialmente, depois da II Grande Guerra. Ambas continuarão necessitando de grandes volumes de material de construção.

Sabe-se que o concreto contém, em média, 12% de cimento, 8% de água e de 80% de agregados. Isso significa que, adicionalmente a 1,5 bilhões de toneladas de cimento que têm sido consumidas anualmente, a indústria de concreto está consumindo 9 bilhões de toneladas de areia e rocha junto com 1 bilhão de toneladas

¹ *Concrete, as a construction material, has been important in the past, is more useful now, and is confidently indispensable in the future.*

² *Application of principles of material science to concrete production technology offers the hope that, in the future, the product available for general construction will be considerably superior in durability and sustainability to the one being used today.*

de água. Assim, as 11,5 bilhões de toneladas de concreto/ano constituem-se o mais alto uso de recursos naturais do mundo. Quando se considera a demanda por concreto complementar de mais 6 bilhões/ano por volta do ano de 2050, podem ser visualizados os danos à natureza. A mineração, o processamento e o transporte de enorme volume de agregados, além de bilhões de toneladas de materiais utilizados para a manufatura do cimento, consomem considerável energia e afetam, de maneira adversa, a ecologia das terras virgens (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

Os autores observam que, tanto nos países desenvolvidos quanto nos em desenvolvimento, as necessidades de construção ou recuperação de obras têm sido significativas e muitas delas se referem a fundações, estruturas e *piers*. Para esses elementos estruturais, o concreto, geralmente reforçado ou pré-moldado, oferece superioridade técnica e econômica sobre o aço.

Na opinião de Mehta (2001), o concreto de cimento Portland é percebido como um 'material amigo e sustentável' quando comparado a outros materiais de construção, mas, contudo, muito deve ser feito para reduzir seus impactos ao meio ambiente. A produção de uma tonelada de cimento Portland libera aproximadamente uma tonelada de CO₂ na atmosfera e, por conseqüência, 1,5 bilhões de toneladas de cimento são responsáveis por cerca de 7% das emissões globais de CO₂.

Em curto prazo, há duas estratégias possíveis para obtenção de redução de emissão de dióxido de carbono associada à produção de cimento: diminuir a quantidade de clinker do produto final o máximo possível e aumentar o uso de adições na produção de cimentos para a construção civil. Dentre as adições tecnicamente aceitáveis e economicamente disponíveis, a 'cinza volante' (*fly ash*) oferece o maior potencial de redução de gases poluentes atribuídos aos materiais componentes do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

Estudos têm comprovado a necessidade da preservação ambiental como sustentabilidade absoluta do planeta. Legislações estabelecem limites para a poluição gerada nos processos de produção, e o desenvolvimento ainda é visto como algo contraditório em relação à proteção do meio ambiente (LIDDLE, 1994).

O setor siderúrgico possui grande importância econômica, principalmente na região centro-sul brasileira, gerando riquezas e milhares de empregos. No entanto, essa atividade industrial produz enormes quantidades de resíduos. Assim, torna-se necessário empregar tecnologias limpas para a redução de sua geração, de seu reaproveitamento e/ou reciclagem de maneira econômica e ecológica. Uma solução para o grande volume de resíduos gerados na indústria siderúrgica é seu aproveitamento como agregados na Construção Civil (OLIVEIRA E SOUZA, 2007).

A indústria da construção civil tem sido responsável por cerca de 20% dos recursos naturais extraídos e, nesse contexto, a utilização de resíduos como matéria-prima pode vir a reduzir a quantidade desses recursos naturais retirados da natureza, substituindo, em grande parte os agregados naturais empregados em concretos, argamassas, blocos, pavers, barreiras de contenção, bases para pavimentação, etc. (FIORITI et al., 2006).

Assim, a discussão mais relevante da atualidade se refere às alternativas que o desenvolvimento de tecnologias pode proporcionar à indústria do concreto sustentável. Uma discussão dessa preocupante realidade deve continuar a buscar a solução das três vertentes principais: o crescimento populacional, a urbanização e o consumo de recursos naturais, que levam todos à presente situação de desenvolvimento insustentável.

A ausência de uma visão holística em relação às necessidades socioeconômicas é a primeira causa dos problemas ambientais. Como observam Mehta e Monteiro (2006), a abordagem holística poderia considerar a sociedade como um todo e a indústria do concreto como uma parte, sabendo-se que o todo existe antes das partes. Dessa forma, na busca por um material de custo mais baixo, a indústria do concreto deve considerar outras necessidades da sociedade, como, por exemplo, a conservação dos recursos naturais e a eliminação de resíduos poluentes produzidos por todas as indústrias. E esse desenvolvimento de idéias passa, necessariamente, pelo âmbito das universidades de engenharia.

Para Wilson (1998), a maioria dos fatores que incomodam a sociedade atual não pode ser resolvida senão com a integração do conhecimento das ciências naturais

com as ciências sociais e humanas. Uma perspectiva de equilíbrio não pode ser alcançada se não houver interação entre as disciplinas que persigam a consiliência entre elas. Mas o que significa essa 'consiliência'? A Figura 7 a demonstra.

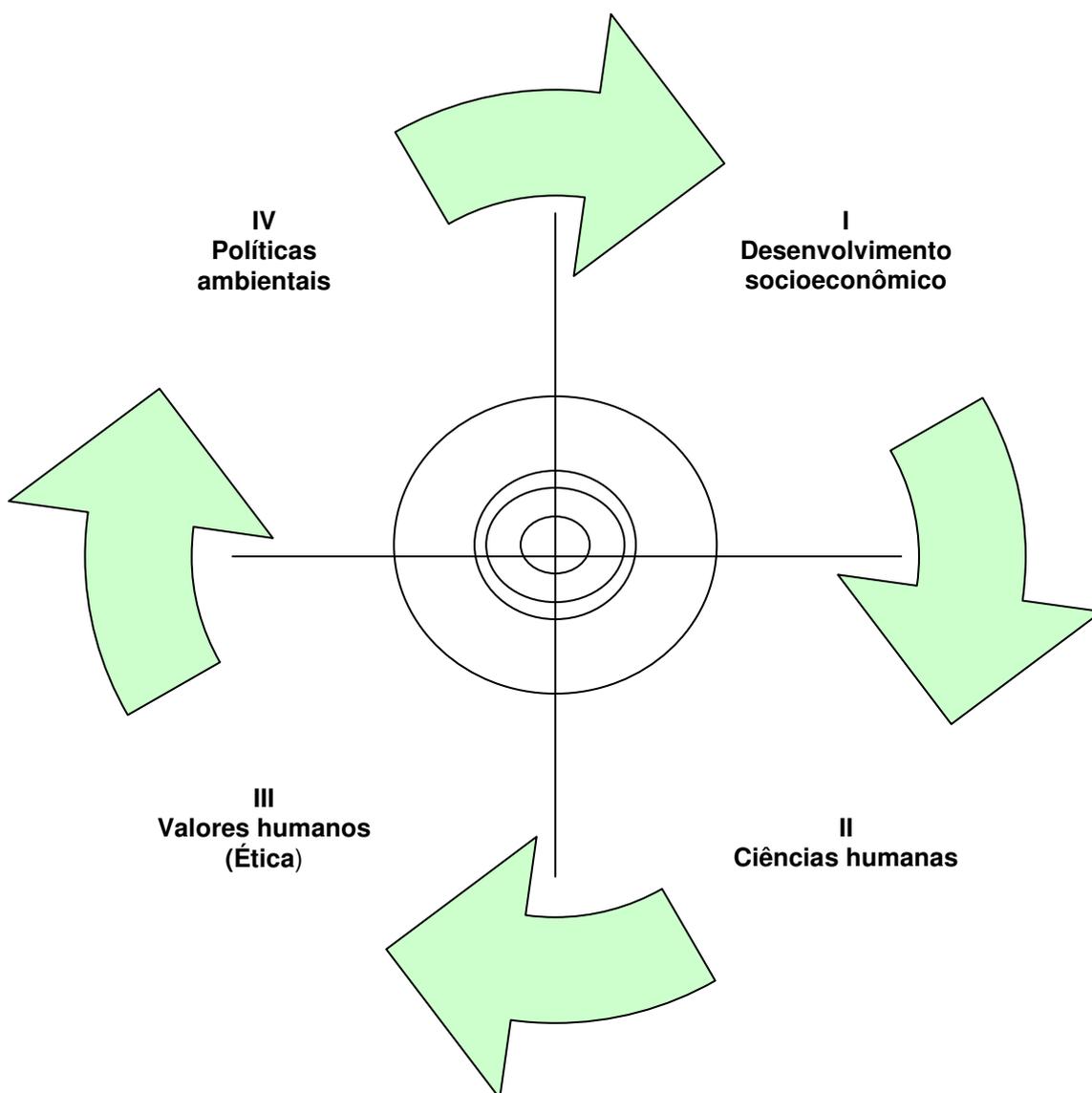


Figura 3 – A idéia de consiliência

Fonte: WILSON (1998, p.325) *apud* MEHTA e MONTEIRO, 2006, p.643.

Wilson (1998) afirma que, intuitivamente, as pessoas devem formar círculos concêntricos ao redor de um ponto de interseção onde se situam os problemas mundiais, sendo que não existe um mapa para isso. Apenas a imaginação das pessoas educadas para uma visão holística do mundo pode levar a humanidade a solucionar seus próprios problemas. Mehta (1999) o complementa, denominando esse paradigma de 'tecnologia para desenvolvimento sustentável' (*technology for sustainable development – TSD*).

O autor deste estudo compactua, firmemente, com essa idéia. Em síntese, a proposta desta dissertação constitui uma pequena contribuição de aproveitamento de resíduos de *sinter feed* como agregado de peças de concreto para pavimentação.

A reciclagem dos resíduos industriais que representam algum valor econômico é uma das formas mais atraentes na solução de problemas no gerenciamento de resíduos, tanto do ponto de vista empresarial como dos órgãos de controle ambiental. O papel da reciclagem é o de diminuir o desperdício, reduzir a quantidade de resíduos encaminhados aos lixões e aos aterros sanitários, bem como aumentar os insumos, pois muitos materiais descartados podem ser utilizados como matéria prima de processos ou serem reutilizados na própria indústria que o descartou. Do ponto de vista ambiental, as motivações para a intensificação da reciclagem se constituem: (1) a diminuição da quantidade de resíduos lançados no meio ambiente; (2) a conservação de recursos naturais não renováveis; (3) a melhoria da saúde e segurança da população; e (4) a preocupação com o meio ambiente (OLIVEIRA E SOUZA, 2007).

Nas aplicações pioneiras de indústrias mineradoras, os rejeitos de sua produção e beneficiamento (em grandes volumes) eram descartados nos leitos dos rios, tendo os procedimentos de disposição evoluído para sistemas de contenção, realizados sem qualquer controle. Entretanto, com o avanço das legislações ambientais e, principalmente, após o registro de rupturas de barragens e pilhas de rejeitos associadas a grandes impactos ambientais, as empresas mineradoras passaram a conceber esses sistemas como obras de engenharia. Por consequência, passaram a destinar maior interesse no atendimento à legislação no sentido de alternativas mais seguras para a contenção de seus resíduos (PEREIRA, 2005).

2.2 – A Mineração de Ferro e seus Rejeitos

Na região central do Estado de Minas Gerais, existe uma área com aproximadamente 7.160 km², denominada Quadrilátero Ferrífero (QF), de grande importância do ponto de vista econômico e ambiental, sendo suas reservas de minério de ferro avaliadas em aproximadamente 29 bilhões de toneladas. Além de abrigar grandes mineradoras de ferro, no Quadrilátero Ferrífero também estão presentes empreendimentos minerais de inúmeros outros tipos de rochas e

substâncias minerais³. Trata-se de uma das mais importantes províncias minerais produtivas do país e a mais conhecida em termos geológicos (PRADO FILHO e SOUZA, 2004; PEREIRA, 2005).

A região é assim denominada em função de sua configuração geométrica, definida como um polígono, delimitado pelas linhas que ligam as cidades de Itabira; Rio Piracicaba; Mariana; Congonhas; Casa Branca; Piedade de Paraopeba; Serra Azul e Belo Horizonte, e cortado pelos Rios das Velhas e Paraopeba.

O estado de Minas Gerais é responsável por mais de 86% das reservas brasileiras de minério de ferro, notabilizando-se pela grande quantidade de plantas de mineração, especialmente as de ferro, espalhadas pela região (QUARESMA, 2001). A produção mundial de minério de ferro em 2003 foi da ordem de 1,1 bilhões de toneladas, tendo o Brasil sido responsável por 20,9% desse total (DNPM, 2004).

Em toda a área do QF, a influência das atividades da mineração nos recursos ambientais e, principalmente, na qualidade dos mananciais hídricos, é bastante significativa, sendo que um dos mais importantes impactos verificados é o intenso carreamento de sólidos para as calhas dos rios e córregos, provocado principalmente pelas indústrias mineradoras, além da constatada degradação da paisagem regional.

Nos empreendimentos mineradores, a disposição de rejeitos provenientes do processo produtivo exige um planejamento racional e criterioso a partir do plano de lavra e das premissas de recuperação do minério, em virtude dos grandes volumes envolvidos. Conforme Pereira (2005) e Gumieri (1995), em geral os rejeitos são dispostos por via úmida através de barramentos construídos com ou sem a utilização dos próprios rejeitos (barragens de contenção) ou por via seca, mediante o empilhamento dos rejeitos, o que não objetiva a retenção de líquidos junto com a matéria sólida descartada.

³ Além das importantes reservas de minério de ferro, o Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais abriga vastas reservas de ouro, calcário, bauxita, manganês, argila, caulim, etc. Nele se localizam cidades como Belo Horizonte, Itabira, Itabirito, Ibirité, Sarzedo, Brumadinho, São Sebastião de Águas Claras, Rio Acima, São José da Lapa, Matozinhos e Nova Lima. Outros municípios, como Ouro Preto e Sabará, floresceram e tiveram seu auge no Ciclo do Ouro.

A construção de uma barragem de rejeitos geralmente é feita pela própria mineradora, e o alteamento ocorre de acordo com a necessidade de armazenamento. Esse processo apresenta vantagens econômicas em relação às barragens convencionais compactadas, que são finalizadas em curto período de tempo antes do enchimento. Contudo, o controle construtivo dessas barragens é limitado, podendo ocorrer rupturas associadas à má aplicação das práticas construtivas (GOMES et al., 2001).

Adicionalmente, as barragens de rejeito são projetadas com a técnica de aterros hidráulicos pelo método de alteamento por montante. Essa metodologia pode apresentar grandes problemas, devido ao fato de existirem restritas especificações técnicas relacionadas a esse tipo de estrutura. Observando essa realidade, Pereira (2005, p.2) afirma que:

Devido à forma de lançamento, os rejeitos granulares dispostos através de aterros hidráulicos podem apresentar densidades relativamente baixas, favorecendo a ocorrência de fenômenos associados à liquefação. Estes fenômenos podem ser deflagrados por carregamentos estáticos e associados, por exemplo, a uma súbita elevação do lençol freático ou a um movimento localizado de massa sem conotações dinâmicas e em uma área francamente assísmica, como é o caso da região do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais.

Em virtude do desenvolvimento industrial e econômico mundial desde a década de 70, foram instaladas grandes mineradoras e grandes investimentos tecnológicos foram realizados na região do QF de Minas Gerais, com vistas ao aumento da capacidade operacional nos processos de concentração e beneficiamento dos minérios itabiríticos. Por consequência, houve incremento substancial de volumes de resíduos, e isso se deve ao próprio processo de mineração.

Esse processo, de acordo com Chammas (1989) citado por Pereira (2005), consiste de um conjunto de atividades apresentadas na Figura 4 que, por um lado, gera riqueza para as indústrias, mas, por outro, provoca grandes transformações e danos ao meio ambiente.

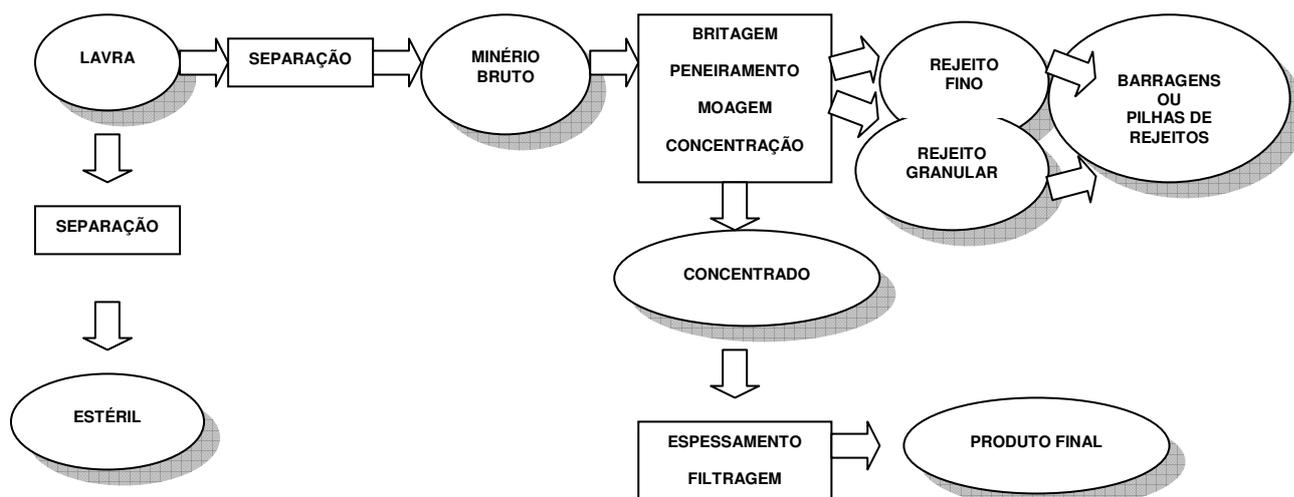


Figura 4 – Fluxograma básico do processo de mineração de ferro

Fonte: PEREIRA, 2005, p.11.

Após o processo de beneficiamento e obtenção de minério de ferro, a atividade mineradora descarta resíduos de baixíssimo ou quase nenhum valor comercial e que, em alguns casos, podem apresentar elevado poder de contaminação (resíduos ativos). Esses resíduos são denominados 'rejeitos de mineração'.

As operações para a extração do minério de ferro envolvem uma série de atividades que determinam as características dos resíduos descartados no processo. Conforme o tipo de processo industrial e do mineral explorado, os rejeitos possuem variadas características geotécnicas, físico-químicas e mineralógicas. Em função da classificação granulométrica, os rejeitos podem ser classificados como finos ou grossos (rejeitos granulares). Pereira (2005) afirma que, apesar de conhecidos dessa forma, tanto os rejeitos finos quanto os mais grosseiros apresentam características granulométricas granulares.

O Quadro 1 demonstra as características dos rejeitos finos e grosseiros.

Quadro 1 – Características de rejeitos

REJEITOS FINOS	REJEITOS GROSSEIROS (GRANULARES)
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Geralmente originados de espessadores e do processo de beneficiamento que envolve a flotação em colunas. ✓ São gerados junto com os rejeitos mais grosseiros e, em alguns sistemas, são lançados separadamente por apresentar diferentes propriedades físicas e geotécnicas. ✓ São extremamente finos, caracterizados por conter frações granulométricas correspondentes a silte e argila (com mais de 90% abaixo de 0,074 mm de diâmetro equivalente, ✓ Alguns apresentam baixos valores de índice de plasticidade. ✓ Pode ser destacada sua elevada compressibilidade no processo de adensamento, o que os condicionam serem estudados a partir de métodos e técnicas de ensaios apropriados para uma avaliação correta e coerente de seu comportamento. ✓ São sugeridas análises a partir da teoria de adensamento a grandes deformações, que descrevem, de forma adequada, a magnitude e o progresso do recalque de materiais finos e de elevada compressibilidade, em função das limitações da teoria clássica de Terzaghi. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Compostos por partículas de granulometria grossa (acima de 0,074 mm). ✓ Apresentam partículas nas frações areia fina a média e, em alguns casos siltosas, sem características de plasticidade. ✓ Algumas características químicas e mineralógicas, oriundas da rocha de origem, exercem influência direta no comportamento geotécnico dos rejeitos granulares. Um exemplo é o teor de ferro, que induz o valor da densidade dos grãos desses materiais. ✓ A massa específica dos grãos, em alguns casos, assume valores da ordem de 5,00 g/cm³, pouco inferiores à hematita pura (5,25 g/cm³).

Fonte: Adaptado de PEREIRA, 2001; PRESOTTI, 2002; SANTOS, 2004.

Por se tratar de subproduto da indústria de mineração e ser desprovido de valor comercial, o conjunto de rejeitos é descartado nas proximidades ou mesmo dentro do complexo industrial, para reduzir os custos relacionados ao seu transporte. Conforme Abrão (1987), a disposição de rejeitos pode ser realizada em cavidades⁴, em ambientes subaquáticos⁵ ou em superfície⁶.

Na superfície, os aterros hidráulicos apresentam vantagens de ordem prática e econômica. Nos aspectos técnicos, pode ser destacada a alta taxa de construção e a separação das partículas pela segregação hidráulica, que possuem efeito direto

⁴ Rejeitos lançados em escavações utilizadas como frente de lavra (*backfilling*). No contexto das disposições de rejeitos de beneficiamento, pode-se dizer que os métodos que utilizam o enchimento de cavidades sejam um pouco mais comuns em países com maiores restrições ambientais que no Brasil (PEREIRA, 2005).

⁵ Rejeitos lançados diretamente no fundo dos mares, lagos ou reservatórios projetados especificamente para a recepção desses resíduos. Sua aplicabilidade esbarra, muitas vezes, em leis ambientais (PEREIRA, 2005).

⁶ O sistema mais comum é a disposição em superfície, compreendendo as pilhas e as barragens de contenção, e esse tipo pode abranger tanto rejeitos previamente secos quanto os de polpa.

na distribuição granulométrica do depósito (MORGENSTERN e KÜPPER, 1988), impondo um processo seqüencial na seleção de partículas (PEREIRA, 2005). Dessa forma, a ação segregadora gera enorme variabilidade estrutural, alterando de forma significativa os parâmetros de resistência, deformabilidade e permeabilidade do rejeito.

Na literatura, existe material bastante restrito no que diz respeito ao rejeito de *sinter feed* porque, até agora, esse era um grande problema de custo para as mineradoras, ou seja, não havia como aproveitá-lo.

2.2.1 – O rejeito de *sinter feed* na Mina de Jangada

Entre outras características, Belo Horizonte se notabilizou pela grande quantidade de plantas de mineração, especialmente as de ferro, espalhadas em seu entorno. Integrantes da zona urbana que constitui a Grande BH, cidades como Nova Lima, Ibirité, Sarzedo, Brumadinho, São Sebastião de Águas Claras, Rio Acima, São José da Lapa, Matozinhos, entre outros, são referências por abrigarem nas áreas de seus municípios importantes complexos industriais de mineração.

No presente trabalho, a abordagem tem como referência as plantas de mineração operadas pela empresa Itaminas, no município de Sarzedo e que, de resto, representam bem o perfil de mineração de ferro desenvolvido nas demais unidades da região.

Em Sarzedo, na Mina de Jangada, a Itaminas alimenta em suas unidades de tratamento de minério de ferro ITM 4, 5 e 6 cerca de 550.000 t/mês, produzindo de 80 a 85% minério de ferro e gerando de 20 a 15% de rejeito fino, também chamado “finos de barragem”, que é direcionado para barragens de rejeito e que, por sua característica, não constituiu objeto desta pesquisa. A produção dessas unidades é totalmente direcionada à exportação, pela empresa MBR.

Em suas unidades ITM 2 e 8, cuja produção é direcionada para as empresas Açominas, Cosipa e CVRD, esta última visando a exportação, são alimentadas cerca de 260.000 t/mês do explorado, produzindo algo da ordem de 68% de *sinter feed*, 12 a 15% de *pallet feed* e o restante constituindo os finos de barragem e o **rejeito de *sinter feed***, objeto do presente estudo.

A geração do rejeito de *sinter feed* nessas unidades é da ordem de **500 a 600 t/dia**, durante **30** dias por mês, **12** meses por ano, o que corresponde a um volume aproximado de **295 m³/dia**. Trata-se de material que no processo de produção do minério de ferro foi submetido a operações de lavagem e peneiramento, apresentando-se sem contaminantes e com razoável regularidade granulométrica. Nas Figuras 5 e 6 pode ser visto, em detalhe, como se apresenta o rejeito de *sinter feed* em um ponto qualquer das suas pilhas de estocagem.

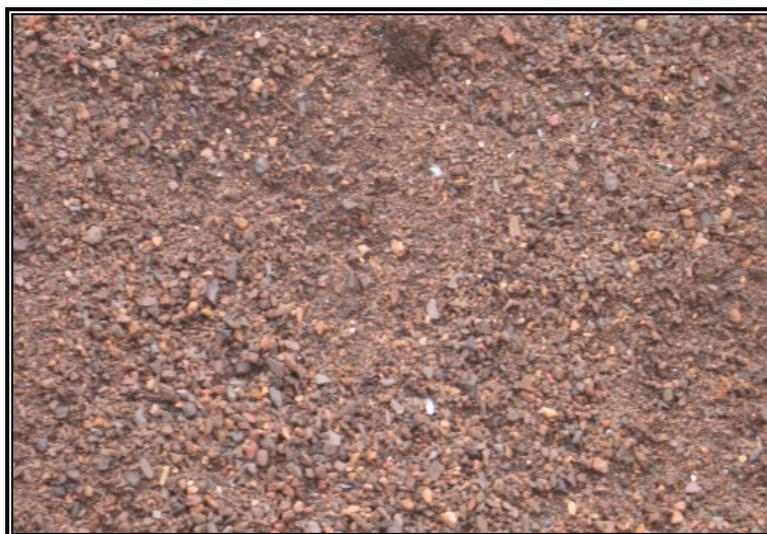


Figura 5 – Detalhe do rejeito de sinter feed estocado em pilhas
Fonte: Arquivo pessoal, 2007.



Figura 6 – Detalhe do rejeito de sinter feed com referência de dimensão
Fonte: Arquivo pessoal, 2008.

Na Tabela 1 são apresentados alguns resultados de ensaios de granulometria realizados em amostras deste rejeito pelo laboratório de análises do Controle de Qualidade da Itaminas.

Tabela 1
Resultado dos ensaios de granulometria realizados pelo laboratório da Itaminas

ITAMINAS – MINA SARZEDO

CONTROLE DE QUALIDADE

Sinter peneirado coletado - Granulometria (% retidas)

DATAS	15/06/06	01/07/06	15/08/06	31/08/06	13/09/06	média
9,51	0	0,5	2,5	0	3	1,2
7,94	1,1	1,1	4,5	0	4,5	0,9
6,35	1,0	1,1	12,3	3,0	12,8	6,0
4,76	2,6	2,7	17,0	11,8	17,3	10,3
3,36	12,7	12,6	18,4	17,7	18,1	15,9
2,38	12,7	12,6	12,8	14,0	13,5	13,1
1,00	22,4	21,3	18,4	25,5	17,2	21,0
0,59	14,4	15,4	6,0	10,3	6,8	10,6
0,297	13,6	13,0	3,8	4,4	3,0	7,6
0,150	8,4	8,2	1,2	4,4	1,5	4,7
0,105	3,2	3,3	1,1	9,5	0,8	3,6
FUNDO	8,6	8,2	1,5	7,4	1,5	5,4

Fonte: Itaminas, 2006.

O rejeito de *sinter feed*, no geral, contém, ainda, significativa quantidade de ferro, cuja maior separação não é possível pelo processo de rolo magnético usualmente existente e utilizado no processo de beneficiamento do minério. Para tanto, exigiria a montagem de uma instalação de jig, que possibilitaria uma separação maior do minério de ferro através de sistema gravimétrico, mas que, em contrapartida, resultaria em elevado consumo de água e também de investimentos, cuja relação custo/benefício não justificou sua adoção até o momento.

O rejeito de *sinter feed* é um resíduo do processo de produção do minério de ferro que, até o momento, não tem nenhum direcionamento comercial para a empresa. Vem sendo depositado, ao longo dos anos, em enormes pilhas junto às áreas de mineração, causando danos maiores ao meio ambiente e exigindo a demanda de custos relativos ao seu transporte interno, manuseio e estoque, controle e

acompanhamento ambientais. As Figuras 7 e 8 apresentam duas vistas das áreas das pilhas de rejeito de sinter feed da Itaminas em suas instalações da Mina da Jangada, em Sarzedo /MG.



Figura 7 – Vista geral das áreas de estoque do rejeito de sinter feed
Fonte: Arquivo pessoal, 2006.



Figura 8 – Vista da dimensão de uma das pilhas de estoque (rejeito de sinter feed)
Fonte: Arquivo pessoal, 2008.

Em média, as pilhas de estoque de rejeito de sinter feed apresentam alturas que equivalem a uma construção de cinco/seis andares, em extensões consideráveis.

2.2.1.1 – Alternativas para utilização do rejeito de *sinter feed*

Como já abordado anteriormente, após a separação do ferro pelo processo de rolo magnético, o rejeito de *sinter feed* ainda apresenta quantidade significativa deste elemento (na condição de não magnético), razão pela qual o processo é ineficaz para uma separação maior da fração não metálica.

Apresenta, portanto, densidade superior aos materiais utilizados correntemente na produção do concreto. A Tabela 2 representa os resultados de algumas análises químicas realizadas de forma rotineira pelo Laboratório de Análises do Controle de Qualidade da Itaminas, com vistas à determinação dos teores dos principais constituintes do rejeito, bem como, a massa unitária do material.

Tabela 2
Resultado de ensaios químicos realizados no laboratório da Itaminas

ITAMINAS – MINA SARZEDO						
CONTROLE DE QUALIDADE						
		<i>Sinter peneirado coletado</i>			<i>Teores %</i>	
DATA		15/06/06	01/07/06	15/08/06	31/08/06	13/09/06
Elementos/Compostos	Fe	55,82	57,45	55,61	56,88	53,49
	SiO₂	14,73	12,34	15,62	13,36	17,84
	Al₂O₃	1,77	1,81	1,27	2,02	1,4
	P	0,143	0,149	0,117	0,276	0,115
	Mn	0,46	0,41	0,53	0,44	0,37
	ppc *	2,58	2,58	2,39	2,60	3,25

Massa unitária : variando de 1,860 a 1,920 Kg/dm³

* ppc = Perda ao fogo.

Fonte: Itaminas, 2006.

Devido à alta densidade do material, não se vislumbra, em princípio, uma utilização interessante do mesmo como agregado para o emprego corrente em obras de concreto armado. Isso implicaria num peso próprio estrutural bastante superior ao usualmente considerado nos projetos e obras comuns, com as consequências naturais que isto implicaria e seus desdobramentos.

Entretanto, como agregado na produção do concreto para elementos de pavimentação, a serem aplicados diretamente sobre o terreno (grifo nosso), além das vantagens de ordem ecológica da utilização do resíduo, contribuiria também para maior estabilidade da pavimentação, na medida que constituiria pavimentos com peso próprio pouco mais acentuado e menos sujeitos a deformações decorrentes das solicitações externas.

Outra aplicação viável para este material seria na produção de blocos de concreto destinados às alvenarias em edificações térreas, onde este acréscimo de peso, descarregado diretamente sobre o terreno, não constituiria aumento relevante de custos relativos à fundação (baldrames, etc.)

Enfim, uma vez avaliada e assegurada a viabilidade técnica do emprego deste material como um insumo alternativo das areias naturais fica, evidentemente, a cargo da ciência e da tecnologia definir as bases do seu efetivo emprego e a ampliação da sua utilização.

Do ponto de vista estético, o emprego desse resíduo confere às peças uma coloração marrom clara e que, após seu assentamento, deixa o pavimento menos sujeito às marcas de uso e eventual encardimento adquirido com o tempo (FIG.9).



Figura 9 – Detalhe de coloração do bloquete convencional e de bloquete com rejeito semelhante

Fonte: Arquivo pessoal, 2007.

A Figura 9 apresenta o aspecto visual considerado: na linha de transição de uma aplicação convencional, a mais clara, e um pavimento com bloquetes utilizando um rejeito semelhante como agregado (mais escura).

Uma experiência semelhante que se conhece sobre a aplicação dos rejeitos de mineração de ferro é a criação do chamado Pavimento Ecológico – o Pavieco.

Iniciativa do jornalista e ambientalista Flávio Passos, o Pavieco constitui o aproveitamento final e o destino do material denominado no setor de mineração de ferro como “finos de barragem”, proveniente das atividades principais de desassoreamento e recuperação ambiental do leito do Córrego da Alegria, seriamente comprometido devido a um acidente ambiental ocorrido no ano de 1969. Após o rompimento de uma barragem de rejeito do consórcio SOMIL / RIO VERDE / MBR, não apenas o Córrego da Alegria, mas toda a bacia do município de São Sebastião de Águas Claras (Macacos) ficou comprometida com a imensa deposição deste rejeito de minério no leito de seus córregos e riachos.

Montou-se uma estrutura operacional através da qual esse rejeito de minério começou a ser retirado dos leitos dos córregos afetados. Contendo impurezas e contaminações diversas, recebeu beneficiamento (peneiramento) no local da planta de produção instalada e, a partir daí, constituiu-se no agregado miúdo com o qual foram produzidas as primeiras peças pré-fabricadas do bloquete para o pavimento intertravado Pavieco.

A Figura 10 mostra um aspecto da estrutura de produção montada, onde ocorria o peneiramento do rejeito junto à caçamba do abastecimento do misturador e da prensa que fabricavam o pavimento.



Figura 10 – Instalação de peneiramento para produção do Pavieco
Fonte: Arquivo pessoal do Jornalista Flávio Passos, 1995.

Na Figura 11 são apresentados os três tipos de peças inicialmente produzidos com o referido rejeito para a pavimentação Pavieco.



Figura 11 – Vista dos primeiros tipos de Pavieco produzidos
Fonte: Arquivo pessoal, 2007.

Ainda na fase de ajustes, a primeira produção e aplicação do Pavieco datam do ano de 1996. Posteriormente, o Pavieco foi produzido e instalado em um trecho de pavimentação da Rua Monte Vista, no bairro Jardim Canadá, em Nova Lima, executado pela MBR como parte das ações compensatórias em contrapartida da instalação da Mina de Capão Xavier naquela região.

Na Figura 12 é visto, em detalhe, uma pequena área desse tipo de pavimentação.



Figura 12 – Detalhe de área da pavimentação no bairro Jd. Canadá
Fonte: Arquivo pessoal, 2007.

Se na experiência do Condomínio Quintas de Casa Branca não houve tecnologia, controle e correção nos ajustes de produção, ao contrário no caso do Pavieco algumas atenções estiveram presentes, tanto que as peças produzidas na citada experiência despertaram atenção pela normalidade da sua aparência. Houve investimento na infra-estrutura e nos equipamentos de produção, de acionamento pneumático inclusive, que proporcionaram peças de bom aspecto e com resistências satisfatórias, embora não se conheça o registro destes resultados. A Figura 13 apresenta uma vista geral do sistema de produção montado em campo.



Figura 13 – Vista da área de produção montada para o Pavieco
Fonte: Arquivo pessoal do Jornalista Flávio Passos, 1995.

Entretanto, não se conheceu a fundamentação tecnológica sobre a matéria prima utilizada e suas análises químicas e físicas, com o objetivo de se concluir sobre aspectos importantes, tais como sua caracterização mineralógica, o atendimento aos requisitos previstos nas normas que regem a classificação do resíduo, o

aproveitamento dos resíduos sólidos, seu comportamento como agregado para o concreto de cimento Portland, bem como a performance esperada de resistência mecânica e durabilidade do produto, de forma sistêmica.

A rigor, não houve quaisquer abordagens neste sentido.

2.3 – Os Agregados para Concreto

O termo ‘agregado’ é de uso generalizado na tecnologia do concreto. “É material particulado, incoesivo, de atividade química praticamente nula, constituído de misturas de partículas cobrindo extensa gama de tamanhos” (ALBUQUERQUE, 2004, p.63).

Na visão de Giammusso (1992), o agregado é um componente inerte que desempenha a função de material de enchimento, constituído por partículas que devem ser cimentadas entre si pela pasta, resultante da hidratação da mistura de cimento e água.

Concreto significa o resultado da mistura de cimento, água, pedra e areia, sendo que o cimento, ao ser hidratado pela água, forma uma pasta resistente e aderente aos fragmentos de agregados (pedra e areia), formando um bloco monolítico.

Para Neville (1997), os principais compostos do cimento Portland são: Silicatos tricálcico (C_3S), Silicatos dicálcico (C_2S), Aluminatos tricálcico (C_3A) e Ferroaluminatos tetracálcico (C_4AF). Em presença de água, os silicatos e aluminatos formam produtos de hidratação que, com o transcorrer do tempo, dão origem a uma massa firme e resistente, a pasta de cimento endurecida. Os principais compostos de hidratação são silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), que dão resistência à estrutura, e os hidróxidos de cálcio ($Ca(OH)_2$) que conferem o caráter alcalino às pastas de cimento.

Mehta e Monteiro (2006) explicam que quando se mistura o cimento com a água, ocorre uma rápida evolução de calor durante poucos minutos, provavelmente representando o calor de dissolução de aluminatos e sulfatos. Entretanto, esta evolução de calor inicial termina rapidamente devido ao fato de a solubilidade dos aluminatos ser reduzida na presença de sulfatos em solução. O ciclo seguinte, após

aproximadamente quatro ou oito horas de hidratação para a maioria dos cimentos Portland, representa a formação da etringita⁷. Muitos pesquisadores acreditam que o período de evolução de calor inclui algum calor de dissolução devido ao C₃S e ao calor de formação de C-S-H. A pasta de um cimento com retardo de pega reterá muito de sua plasticidade antes do começo deste ciclo de calor e vai enrijecer e mostrar o início de pega (começo de enrijecimento) antes de atingir o ápice, o qual corresponde ao fim de pega (enrijecimento completo e início do endurecimento).

A definição de pega refere-se à mudança do estado fluido para um estado rígido. Embora, durante a pega, a pasta adquira certa resistência, para efeitos práticos é importante distinguir pega de endurecimento, que se refere ao aumento de resistência de uma pasta de cimento depois da pega (NEVILLE, 1997).

Há aditivos aceleradores de pega, quando o objetivo é proporcionar que as reações de hidratação tornem-se mais rápidas proporcionando que peças sejam desformadas em menor espaço de tempo; e aditivos retardadores de pega, quando o objetivo é proporcionar que o concreto esteja fluido em um maior espaço de tempo.

Os agregados possuem custos relativamente baixos, não penetram nas reações químicas complexas com a água e tradicionalmente eram tratados como materiais inertes no concreto. Entretanto, devido ao papel desenvolvido na determinação de propriedades importantes do concreto, essa visão de material inerte tem sido seriamente questionada. As características dos agregados consideradas relevantes na manufatura do concreto incluem porosidade, distribuição de tamanho, absorção de mistura, textura de forma e superfície, resistência, elasticidade e o tipo de substâncias deletérias presentes. Estas características derivam da composição mineralógica das rochas, que é afetada pelos processos de sua formação, às condições de exposição a que foram submetidas antes da mineração e o tipo de equipamento usado para produzir os agregados. Os agregados minerais naturais compreendem 90% do total de agregados usados para a manufatura do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

⁷ Etringita, Ca₆Al₂(OH)₁₂(SO₄)₃26H₂O, um sulfoaluminato formado durante o processo de hidratação do cimento (NEVILLE, 1997).

A norma ASTM C 294, bem como a NBR 9211 (ABNT, 1983); a NBR 7216 (ABNT, 1987); e a NBR 7217 (ABNT, 1987) contêm descrições úteis para a compreensão dos termos utilizados para designar e classificar as características dos agregados.

Os agregados são classificados como artificiais ou naturais, sendo artificiais as areias e pedras provenientes do britagem de rochas, pois necessitam da atuação do homem para modificar o tamanho dos seus grãos. Como exemplos de naturais, podem ser citados as areias extraídas de rios ou barrancos e os seixos rolados (pedras do leito dos rios). Outro fator que define a classificação dos agregados é sua massa unitária (ou massa específica aparente), podendo ser divididos em leves (argila expandida, pedra-pomes, vermiculita), normais (pedras britadas, areias, seixos) e pesados (hematita, magnetita, barita) (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

Ainda segundo os autores, agregados que pesem menos que 1.120kg/m^3 são geralmente considerados leves, e encontram aplicação na produção de vários tipos de concretos leves. Os normais possuem densidade de 1.520 a 1.680 kg/m^3 , e produzem o 'concreto normal' com aproximadamente 2.400 kg/m^3 de peso unitário. Comparado ao agregado de peso normal, o concreto pesado varia de 2.900 a 6.100 kg/m^3 , sendo utilizado primariamente para locais destinados à pesquisa de radiação nuclear.

Devido à importância dos agregados dentro da mistura, vários são os ensaios necessários para sua utilização, que servem para definir sua granulometria, massa específica real e aparente, módulo de finura, torrões de argila, impurezas orgânicas, materiais pulverulentos, etc.

Mehta e Monteiro (2006) consideram de fundamental importância o conhecimento das características do agregado para a proporcionalidade nas misturas de concreto. Geralmente, as propriedades dos agregados afetam não apenas as proporções da mistura de concreto, mas também o comportamento do concreto fresco e endurecido. Assim, dividem as características dos agregados em três grupos:

- (1) Dependentes da porosidade: densidade, absorção, resistência, dureza, módulo de elasticidade e solidez⁸;
- (2) Dependentes de exposição prévia e fatores de processamento: o tamanho das partículas, sua forma e textura;
- (3) Características dependentes da composição química e mineralógica: resistência, dureza, módulo de elasticidade e presença de substâncias deletérias.

Os agregados se classificam em grãos e miúdos, de acordo com o tamanho das partículas. A norma brasileira NBR 7211 (ABNT, 2005) define o agregado grão como sendo o agregado cuja maior parte de suas partículas fica retida na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, ou a porção retida nessa mesma peneira. Agregado miúdo é definido na mesma como aquele que passa na peneira com abertura de malha de 9,5 mm, que passa quase totalmente na peneira 4,75 mm e fica retido, em sua maior parte, na peneira 75 μm , ou se define como a porção que passa na peneira de 4,75 mm e fica retida quase totalmente na peneira de 75 μm .

As partículas arredondadas ou subarredondadas e de textura superficial lisa, como o seixo rolado, favorecem a plasticidade do concreto, exigindo menos água de amassamento. Em contrapartida, a ligação matriz-agregado, no estado endurecido, é prejudicada (RODRIGUES, 1995).

Agregados provenientes de britagem que possuam forma cúbica e com textura superficial rugosa apresentam maior área específica e requerem, portanto, maior quantidade de água de molhagem. As arestas vivas desses grãos provocam também maior atrito entre eles, aumentando, conseqüentemente, o consumo de água, areia e cimento. Os agregados cujas partículas são lamelares ou alongadas necessitam de uma maior quantidade de areia para uma dada plasticidade, aumentando o consumo de água e cimento da mistura.

As características dos materiais agregados possuem grande influência no processo de dosagem do concreto. A granulometria da areia ou agregado tem grande

⁸ Um agregado é considerado 'com solidez' quando a mudança de volume do agregado induzido pelo tempo (ciclos alternativos de umidade e secagem, ou congelamento e degelo) resulta na deterioração do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2006, p.270).

influência nas propriedades das argamassas. O Quadro 2 apresenta um comparativo entre as características da areia e as principais propriedades das argamassas.

Quadro 2 – Influência da granulometria da areia nas propriedades da argamassa

Propriedades da Argamassa	Características da areia		
	Quanto menor o módulo de finura	Quanto mais descontínua for a granulometria	Quanto maior o teor de grãos angulosos
Trabalhabilidade	Melhor	Pior	Pior
Retenção de Água	Melhor	Variável	Melhor
Elasticidade	Pior	Pior	Pior
Retração na secagem	Aumenta	Aumenta	Variável
Porosidade	Variável	Aumenta	Variável
Aderência	Pior	Pior	Melhor
Resistência Mecânica	Variável	Pior	Variável
Impermeabilidade	Pior	Pior	Variável

Fonte: GUIMARÃES, 1997, citado por CRUZ, 2002, p.27.

Para o cimento, destacam-se as seguintes características:

(a) Finura – fator que governa a velocidade de reação da hidratação. Seu aumento melhora a resistência, principalmente nas primeiras idades, diminui a exsudação⁹ e outros tipos de segregação¹⁰, aumenta a impermeabilidade, a trabalhabilidade e a coesão do concreto. Em contrapartida, ocorre a liberação de maior quantidade de calor e uma retração maior, ficando o concreto mais sensível ao fissuramento;

(b) Perda ao fogo e resíduo insolúvel – fornece indicações como ocorrerá a carbonatação e a hidratação devido à exposição do cimento ao ar, ou seja, o envelhecimento do cimento;

(c) Resistência à compressão – em sua verificação, torna-se possível conhecer previamente o comportamento mecânico do cimento. Normalmente os testes são feitos nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias.

Para os agregados miúdos, Ribeiro et al. (2006) destacam:

⁹ Exsudação é definida como um fenômeno, cuja manifestação externa é o aparecimento de água na superfície, após o concreto ter sido lançado e adensado, porém antes de ocorrer sua pega (ou seja, quando a sedimentação não puder mais ocorrer (HELENE et al., 1999, p.357). É um tipo de segregação e é característica das misturas de concretos muito fluidas.

¹⁰ Segregação é a separação dos componentes do concreto fresco, de tal forma que sua distribuição não seja mais uniforme. Existem dois tipos: (1) característica de misturas secas, consiste na separação dos agregados da argamassa do concreto; (2) exsudação, anteriormente definida.

(a) Composição granulométrica (granulometria) – expressão das proporções de partículas de diferentes tamanhos que compõem o agregado. Possui influência direta sobre a qualidade dos concretos e argamassas, principalmente nos aspectos relativos à trabalhabilidade, à compacidade e à resistência aos esforços mecânicos;

(b) Módulo de finura (MF) – soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado nas peneiras da série normal, dividida por 100. Está relacionado com a área superficial do agregado e o seu valor conseqüentemente altera a água de molhagem, para certa consistência. Deve ser mantido constante dentro de certos limites para evitar alteração do traço;

(c) Massa unitária – significa a relação entre a massa e o volume de sólidos, incluindo os vazios, sob determinadas condições de compactação. Por meio da massa unitária são feitas as transformações dos traços em massa para volume e vice-versa;

d) Massa específica – segundo a NBR NM 52 (ABNT, 2003), a massa específica é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis e o espaço vazio entre os grãos.

(e) Inchamento – aumento de volume de determinada massa de agregado, causado pela absorção de água. Possui fundamental importância na dosagem dos materiais em volume, pois, dependendo da umidade, podem ser obtidas diferentes massas de agregados para um mesmo volume, sendo necessária a correção do traço.

Para os agregados graúdos, as características de maior influência na dosagem do concreto são a composição granulométrica (granulometria), a massa específica e a dimensão máxima característica (DMC). Esta se constitui uma grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado, correspondente à abertura de malha quadrada, em milímetros, à qual corresponde uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa. Quanto maior for a DMC, mais barato o concreto. Ela está relacionada ao concreto fresco, portanto depende das formas, do espaçamento entre as armaduras e do processo de transporte do concreto (OLIVEIRA e SOUZA, 2007).

2.3.1 – Areia Natural e sua Exploração

Geologicamente, areia “é um sedimento clástico inconsolidado, de grãos em geral quartzosos de diâmetro entre 0,06 e 2,0 mm” (BAUER, 1994, p.78). Como material de construção, necessita ter grãos formados de material consistente e não necessariamente quartzosos.

A areia natural quartzosa, lavada, seja de barranco ou de rio, é obtida por meio de processos de desmonte ou dragagem, em ambos os casos contribuindo enormemente para a degradação ambiental dos locais e das cercanias de sua exploração, geralmente próximo aos grandes centros.

A degradação do meio ambiente devido à extração de areia caracteriza-se, principalmente, pelos seguintes aspectos:

- Retirada da cobertura vegetal;
- Grande erosão das áreas exploradas;
- Assoreamento dos leitos hídricos e
- Significativa alteração paisagística.

Nos locais de exploração, a camada de areia constitui um filtro físico e biológico para as águas subterrâneas, que certamente apresentarão também algum comprometimento em sua qualidade, ao final destas atividades.

Não raro, as áreas remanescentes da atividade de exploração de areia apresentam os aspectos de degradação semelhantes aos das Figuras 14, 15 e 16 a seguir.

Cabe lembrar que areias de praias e dunas próximas de litorais não são utilizadas para o preparo do concreto por causa de sua grande finura e alto teor de cloreto de sódio.

A NBR 7211 (ABNT, 2005) estabelece os módulos de finura para agregados miúdos, que significa a soma das percentagens acumuladas na série normal dividida por 100. Assim, existem as zonas: ‘ótima’ – $2,20 < MF < 2,90$; ‘utilizável inferior’ – $1,55 < MF < 2,20$; e ‘utilizável superior’ – $2,90 < MF < 3,50$.



Figura 14 – Vista por satélite de área de exploração de areia de barranco
Fonte: GOOGLE, 2009.



Figura 15 – Vista local de área degradada após exploração de areia
Fonte: Arquivo pessoal, 2008.



Figura 16 – Vista local de área degradada após exploração de areia
Fonte: Arquivo pessoal, 2008.

Com a constante e cada vez mais crescente evolução da construção civil e a falta de materiais alternativos em qualidade e quantidade, as areias naturais têm sido um material cada vez mais escasso no entorno das grandes cidades, além,

evidentemente, da sua heterogeneidade. A areia natural constitui um bem finito e não renovável.

A alternativa da sua obtenção em fontes mais distantes estabelece, além do seu valor próprio, o aumento significativo dos custos de transporte, que já possui um peso relativo elevado no processo, tornando o custo deste material ainda mais dispendioso.

2.3.2 – As Britas

Brita “é agregado obtido a partir de rochas compactas que ocorrem em depósitos geológicos – jazidas, pelo processo de ‘cominuição’ ou fragmentação controlada da rocha maciça” (BAUER, 1994, p.64).

As britas representam um dos principais insumos da construção civil, chegando a representar mais de 60%, em média, do volume construído. São obtidas através da cominuição de rochas do tipo granitos¹¹, gnaisses¹², basaltos¹³, diabásios, migmatitos, calcários¹⁴ e dolomitos¹⁵. Em relação à granulometria, são classificadas em britas 1, 2 e 3, pedrisco e pó de pedra. A brita 3 é utilizada como lastro ferroviário; a brita 2 serve como agregado em grandes volumes de concreto e como brita classificada na formação de base e sub-base de pavimentos. A brita 1 constitui-se o produto mais nobre e é aplicada, essencialmente, em concretos esbeltos e bombeados. O pedrisco e o pó são aplicados, basicamente, como matérias-primas de massas asfálticas (SAMPAIO e CARVALHO, 2002).

Britas são produzidas em estabelecimentos industriais denominados ‘pedreiras’.

A Figura 17 mostra um possível fluxograma de pedreiras, mas o fluxograma ideal dependerá das condições particulares de cada caso. Na jazida, a rocha é fragmentada por meio de explosivos carregados em furos de brocas de aproximadamente 80 mm de diâmetro. A detonação é o ‘fogo de bancada’, que

¹¹ Granito – rocha plutônica ácida (\cong 75% de sílica) granular macroscópica; cristais de 1 a 5 mm ou maiores, de cor cinza (BAUER, 1994, p.65).

¹² Gnaisse – rocha metamórfica granular macroscópica (BAUER, 1994, p.65).

¹³ Basalto – rocha vulcânica básica (\cong 50% de sílica) de cor cinza escura (BAUER, 1994, p.65).

¹⁴ Calcário – rocha sedimentar constituída de mais de 50% de carbonato de sódio (BAUER, 1994, p.65).

¹⁵ Dolomito - rocha sedimentar constituída de carbonato de sódio e magnésio (BAUER, 1994, p.65).

produz blocos de dimensões que podem superar um metro. A seguir, ocorre nova fragmentação por explosivos (fogacho), cuja função é reduzir os blocos a dimensões não superiores à boca do britador primário (BAUER, 1994).

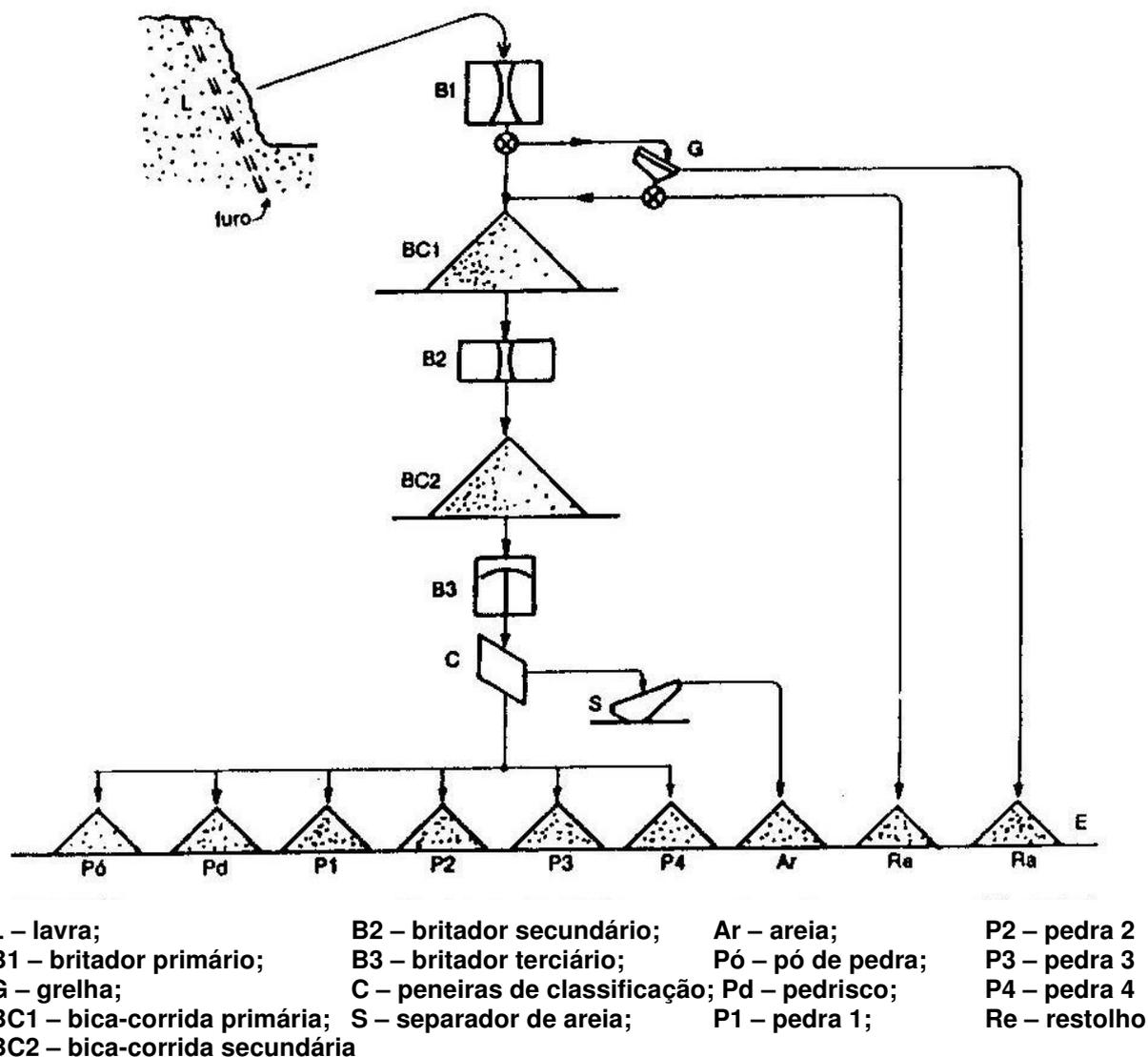


Figura 17 – Fluxograma típico de pedreiras

Fonte: BAUER, 1994, p.73.

O projeto de classificação depende da demanda estabelecida pelo mercado.

- Pedra britada

Consiste em produto de cominuição de rocha que se caracteriza por tamanhos nominais de grãos enquadrados entre 2,4 e 64 mm, segundo as divisões padronizadas pela NBR 5564 (ABNT, 1991).

Para a produção de agregado, as granulometrias são definidas na NBR 7211 (ABNT, 1983; 2005). A Figura 18 apresenta os limites granulométricos para agregados graúdos e a Figura 19 para miúdos.

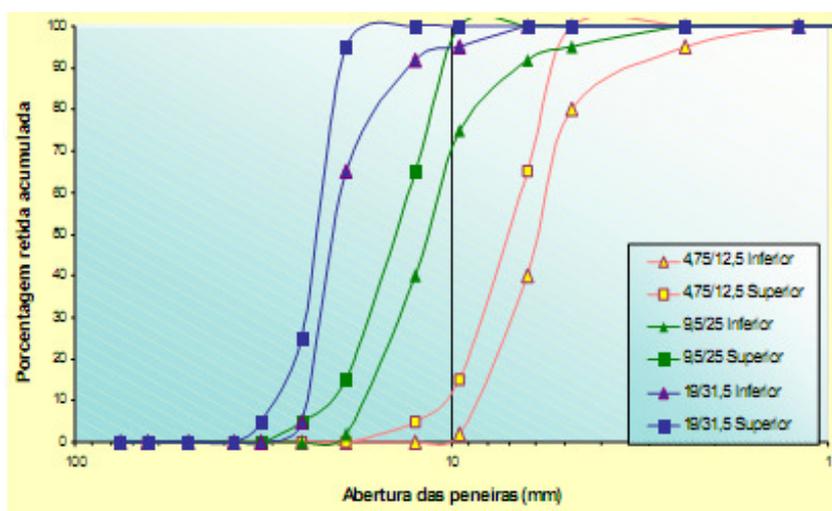


Figura 18 – Limites granulométricos para agregado graúdo

Fonte: RIBEIRO, 2009, p.36

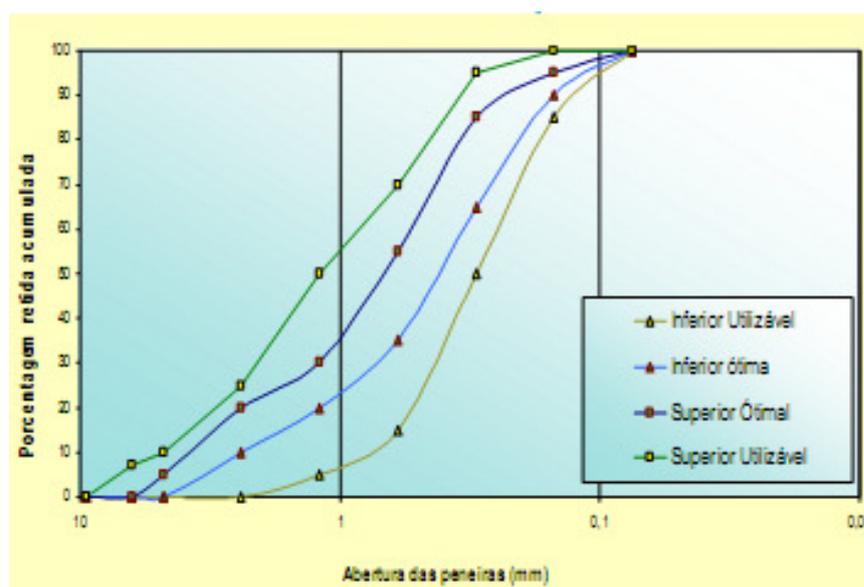


Figura 19 – Limites granulométricos para agregado miúdo

Fonte: RIBEIRO, 2009, p.37

Conforme Bauer (1994), as propriedades físicas das rochas pouco diferem entre as pedreiras, com três exceções na rocha gnáissica (resistência à compressão, resistência à abrasão e porosidade).

A NBR 7211 (ABNT, 1983; 2005), que trata de agregados para concreto, padroniza a pedra britada.

- Pó de pedra

Em virtude do próprio processo industrial, as pedreiras produzem, além da pedra britada, o pó de pedra, agregado de graduação 0/4,8. Sua curva granulométrica pode diferir de pedreira para pedreira, pois ele é formado pelo material que passa na peneira industrial de 2, 4 mm.

- Areia de brita

É produzida nas pedreiras que dispõem de instalação de lavagem de brita. A água de lavagem é levada para o separador, onde a areia é retirada. Em média, essa areia (granito) possui graduação média de 0,15/4,8 (BAUER, 1994).

- Filer

É utilizado em mastiques betuminosos, concretos asfálticos, espessamento de betumes fluidos e na vulcanização de borracha. Constitui-se material fino que decanta nos tanques de instalações de lavagem de brita nas pedreiras, composto de filer e areia. O filer é retirado em operações de tanques alternados, um em processo de decantação e outro em processo de extração. Uma vez separado da areia pela peneira de 0,075, possui superfície específica da ordem de 10 a 28 m²/N (1.000 a 2.800 m²/kg).

- Bica-corrída

Não é produzida usualmente, mas apenas sob encomenda. Constitui-se bica-corrída secundária, de graduação 0/76.

- Rachão

Como a brita-corrída, é de produção eventual. Significa a fração acima de 76 mm da bica-corrída secundária ou, de vez em quando, de bica-corrída primária. Sua graduação vai de 76/200 a 76/300, dependendo das regulagens e dos tipos de britadores (BAUER, 1994).

- Restolho

Subproduto de algumas pedreiras de rocha menos sã, sendo retirado do fluxo à saída do britador primário.

- Blocos

Resultado dos fogos de bancada. Suas dimensões dependem da morfologia da rocha e do tamanho do britador primário, e variam de um a três metros de dimensões extremas.

2.4 – A Pavimentação e o Pavimento Pré-moldado de Concreto

Há 25 séculos, houve interesse pela cobertura de trilhas e caminhos com a colocação de pedras em estado natural, dando origem aos primeiros revestimentos para proteção e facilidade de acessos. Posteriormente, os veículos de tração animal exigiam uma superfície de rolamento mais uniforme, quando se passou a talhar as pedras para conseguir melhor ajuste entre elas. Pode-se considerar que assim foram constituídas as primeiras ações planejadas de pavimentação de vias. Com a invenção do automóvel, tornou-se pouco econômico e nada prático talhar as grandes quantidades de pedras que o ritmo de pavimentação exigia. A argila cozida tornou-se solução para a fabricação das peças, com resultados aceitáveis, mas com rápido desgaste.

Os precursores dos pavimentos rígidos foram os ingleses, que iniciaram a sua construção em 1865. O primeiro pavimento de concreto construído nos Estados Unidos data de 1891 e hoje funciona como calçadão para pedestres. Foi executado na cidade de Bellefontaine, no estado de Ohio. Em diversos países, principalmente Alemanha e Estados Unidos, o pavimento de concreto passou a ter preferência para auto-entradas, antes da Segunda Guerra Mundial. Nessa época, a Alemanha tinha 92% de suas auto-estradas em concreto. No fim dos anos 50, os Estados Unidos tinham 89% das grandes vias urbanas e 79% das vias rurais pavimentadas com concreto. No Brasil, o primeiro pavimento de concreto foi executado no Caminho do Mar (São Paulo a Cubatão) em 1925. Em seguida foi realizada, em concreto, a pavimentação da travessia de São Miguel Paulista, da antiga estrada Rio-São Paulo, em 1932 (SENÇO, 2005).

Com custo de construção competitivo, o pavimento de concreto tem grande durabilidade e requer baixíssima manutenção. Estudos de viabilidade demonstram que é a solução técnica ideal para vias públicas (corredores de ônibus, por exemplo) e rodovias submetidas a tráfego intenso e pesado de veículos comerciais. Ressalta-se que o pavimento de concreto é extremamente resistente quando submetido à ação das chuvas e não oxida.

Mais durável, seguro e ambientalmente amigável, o pavimento de concreto economiza combustível e iluminação pública, diminui o custo operacional dos veículos e o índice de acidentes nas rodovias e vias urbanas, reduzindo o custo social. Referência deve ser feita ao pavimento de concreto da Rodovia Itaipava – Teresópolis, construído em 1928, ou seja, há mais de 80 anos e encontra-se em operação até hoje, com um nível de manutenção significativamente baixo.

O pavimento de concreto traz vantagens em relação ao asfáltico, mencionando-se a durabilidade 3 a 6 vezes superior, vida útil variando de 25 a 40 anos, mesmo com um volume de tráfego elevado, enquanto a manutenção de um bom pavimento asfáltico começará em torno do 5º ano. Exibe maior resistência à degradação face ao derramamento de óleo, maior resistência ao rolamento, particularmente para caminhões, sendo que a economia de combustível referida pode alcançar a ordem de 20%. A economia de energia elétrica, com postes, luminárias e com sinalização é de aproximadamente 30%.

Um amplo elenco de considerações é apresentado a seguir, estabelecendo aspectos comparativos entre o pavimento de concreto e o pavimento asfáltico (QUADRO 3).

Quadro 3 – Comparação entre piso de concreto e piso de asfalto

	Piso de concreto	Piso de asfalto
Até 1950	Uso intenso	
Entre 1950 e 1970	<ul style="list-style-type: none"> - Relativa inércia para o desenvolvimento de piso de concreto, mesmo o asfalto deixando de ter interesse econômico. - Mesmo com a necessidade de rodovias de penetração, nas quais o piso de concreto seria mais interessante devido à independência da qualidade do solo. - Críticas subjetivas de que ‘o custo de concreto é maior do que o asfalto’, e ‘é mais fácil se trabalhar com o asfalto’, totalmente inadequadas. 	<ul style="list-style-type: none"> - O cimento foi necessário na construção civil. - O petróleo era barato. - Desenvolvimento de pisos flexíveis nos EUA, à base de produtos betuminosos. - Estímulo de tecnologia de equipamentos. - Formação de mão-de-obra para piso asfáltico
Após 1970	<ul style="list-style-type: none"> - Em médio e longo prazo, os pisos de concreto geram menor custo anual. - O custo final (custo inicial + custo de manutenção + custo do usuário) é mais baixo do que o piso flexível. 	<ul style="list-style-type: none"> - Custo de manutenção freqüente e elevado. - Paradas de tráfego para manutenção. - Maior custo para o usuário.
Após 2000	<ul style="list-style-type: none"> - O principal componente dos pavimentos de concreto, o cimento Portland, produto nacional que utiliza dois materiais básicos cuja abundância é indiscutível - o calcário e a argila. Produzidas 40 milhões de toneladas anualmente, continua com boa margem de ociosidade – o que significa haver campo para que se produzam, cada vez mais, pavimentos à base desse material. - Produto nacional e usando preponderantemente matérias-primas copiosamente existentes na Natureza, o cimento Portland brasileiro é hoje fabricado graças ao esforço desenvolvido pela indústria do cimento, por processos que minimizam o consumo energético. - O pavimento de concreto é aliado efetivo da proteção ambiental, por motivos diversos: não aumenta a temperatura do ar (recebe o calor e o dissipa rapidamente, enquanto o asfalto o absorve e conserva). Pode incorporar (em sua massa) resíduos industriais, até mesmo de natureza tóxica, e de construção civil, diminuindo o chamado <i>passivo ambiental</i> criado pela deposição desses detritos em aterros sanitários, cada vez mais escassos e que ocupam áreas urbanas aproveitáveis. - É totalmente reciclável ao fim de sua vida útil. O cimento Portland, seu principal componente, agrega valor a subprodutos industriais como escórias de alto-forno, cinzas volantes de termelétricas, gesso sintético etc., que não teriam uso prático senão de ser incorporados ao cimento. 	<ul style="list-style-type: none"> - O óleo produzido no Brasil não se presta para cimento asfáltico, tendo que ser importado.

CONTINUA

	Piso de concreto	Piso de asfalto
Vantagens / Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - O concreto requer uma só passagem do equipamento para sua construção. - O equipamento para a pavimentação de concreto mais adequado à maioria das estradas brasileiras é o de pequeno ou médio porte. - O domínio brasileiro sobre a tecnologia de concreto é amplo e disseminado em todas as empresas construtoras, que podem usar o concreto pré-misturado, sem o ônus da instalação de central própria. - Preocupação atual com o aprimoramento do processo de produção, que levou a um dos menores consumos médios de energia para obtenção de cimento Portland, hoje cerca de 60% menor do que a que se despendia em 1970. - Grande durabilidade, que se deve às propriedades estruturais do material. - Elevada resistência mecânica e ao desgaste. - Praticamente impermeável. - Os defeitos contingentes são de pequena monta e sempre bem localizados e delimitados. - O concreto pode ter ainda como acabamento uma textura superficial que aumente significativamente a segurança de rolamento em condições de superfície úmida, sem perda do conforto requerido pelo usuário. 	<ul style="list-style-type: none"> - O pavimento asfáltico é construído em camadas múltiplas.
	<ul style="list-style-type: none"> - O pavimento de concreto tem excelente capacidade de reflexão da luz, requerendo até 60% menos iluminação (dados de Buenos Aires, Argentina) e, por isso, menor gasto com energia elétrica e maior distância entre os pontos de iluminação. 	<ul style="list-style-type: none"> Pela sua coloração escura, com o piso asfáltico ocorre o inverso.
	<ul style="list-style-type: none"> A resistência à derrapagem da superfície de concreto pode ser estabelecida nas próprias operações de acabamento do pavimento. 	<ul style="list-style-type: none"> Isso não se dá no caso dos pavimentos asfálticos.
	<ul style="list-style-type: none"> A inclinação transversal necessária à seção do pavimento de concreto é de 2 a 3 vezes menor do que a do flexível, resultando em menor possibilidade de derrapagem e tombamento do veículo em situações críticas. 	
	<ul style="list-style-type: none"> A velocidade de escoamento da água na superfície do concreto é muito superior à do pavimento asfáltico, o que dá melhor resistência à derrapagem por hidroplanagem. 	

Fonte: Adaptado de PITTA, 1998.

Para Senço (2005, p.409), o dimensionamento desse tipo de pavimento consiste na

Determinação das camadas de reforço do subleito, sub-base, base revestimento, de forma que essas camadas sejam suficientes para resistir, transmitir e distribuir as pressões resultantes da passagem dos veículos ao subleito, sem que o conjunto sofra rupturas, deformações apreciáveis ou desgaste superficial excessivo.

Os critérios gerais de dimensionamento de pavimentos envolvem:

- A carga de roda, embora resulte em uma superfície de contato com o pavimento (parcialmente elíptica), pode ser considerada 'circular de raio r ';
- Essa carga de roda provoca distribuição de pressões parabólicas sob o pneu, resultando em pressão nula no perímetro da superfície de contato e máxima no centro dessa superfície. Pode, também, considerar a pressão de contato uniformemente distribuída ' q ' na superfície de contato circular;
- O subleito recebe, na interface com o pavimento, uma pressão inferior à pressão de contato e tanto menor quanto mais espesso o pavimento e quantos mais nobres forem os materiais componentes da camada desse pavimento.

Assim, pode-se dizer que o critério geral para o dimensionamento de pavimentos consiste do seguinte:

Partindo de uma carga repetida provocada pelo tráfego ' q ' e, em função das condições de suporte de semi-espaço infinito, que é o subleito \square_2 , calcula-se a espessura total necessária e as fatias correspondentes às camadas do pavimento, considerando nesse cálculo a qualidade dos materiais a serem utilizados nessas camadas, que pode ser representada pelo ângulo da distribuição de pressões (SENÇO, 2005, p.417).

Carvalho (2007) afirma que a capacidade de reflexão de luz de pavimentos de concreto se traduz em economia de iluminação pública, como demonstrado no Quadro 4.

Quadro 4 – Economia de Energia Elétrica

ECONOMIA DE ENERGIA ELÉTRICA	
SITUAÇÃO	
Quarteirões com 100m de lado	
Ruas de 8m de largura	
Iluminação 11 horas/dia	
Custo de energia de US\$ 0,20/kWh	
ASFALTO	CONCRETO
5,35 kWh/m ²	3,35 kWh/m ²
US\$ 1,07/ m ²	US\$ 0,67/ m ²
RELAÇÃO ASFALTO / CONCRETO > 60%	

Fonte: Carvalho, 2007, p.14.

A menor distância de frenagem é promovida pelo fato de que, no pavimento de concreto, há maior aderência dos pneus à superfície de rolamento (QUADRO 5).

Quadro 5 – Menor distância de frenagem

Distâncias comparadas			
Condição de superfície	Distância de frenagem		
	Concreto	Asfalto	Asfalto / Concreto
Seca e Nivelada	50	58	16%
Úmida e Nivelada	86	109	14%
Úmida com trilha de roda	96*	134	40%

* No caso de piso de concreto, sem trilha de roda.

Veículo usado: Chevy a 95 km/h.

Fonte: CARVALHO, 2007, p.15.

Conforme Carvalho (2007), recente estudo conduzido pelo Conselho Nacional de Pesquisa do Canadá comprovou que caminhões podem economizar 11% de combustível rodando em rodovias de concreto, que em relação as de asfalto. Segundo a pesquisa, a principal razão para essa economia, que pode chegar a 17%, está na superfície rígida, indeformável e estável do pavimento de concreto, que cria menor resistência ao rolamento e exige menor esforço da parte mecânica dos veículos (QUADRO 6). Além disso, o estudo relata que o pavimento de concreto traz benefício ambiental adicional, que é a contribuição na redução da emissão de gases poluentes pelos veículos na atmosfera, como o monóxido de carbono, em função da sua maior liberdade de rolamento nesse tipo de superfície.

Quadro 6 - Economia estimada de combustíveis em trecho rodoviário de concreto x trecho de asfalto, para tráfego médio diário de 25.000 veículos

ECONOMIA DE COMBUSTÍVEL – RODOVIA DE CONCRETO – 16 KM		
Tipo de veículo	Porcentagem do tráfego	Economia estimada de combustível (litros/ano)
Automóveis	70	0
Caminhonetes (picapes)	12	227.970
Caminhões leves e médios (2 eixos)	3	155.564
Caminhões pesados (3 eixos)	1	120.552
Reboques e Semi-Reboques (+- 4 eixos)	14	1.933.378
TOTAL		2.437.464

Fonte: CARVALHO, 2007, p.16.

O Quadro 7 a seguir apresenta análise de acompanhamento comparativo durante 21 anos, inclusive informando seus aspectos econômicos.

Quadro 7 – A história dos pavimentos asfáltico e de concreto

A HISTÓRIA DE DOIS PAVIMENTOS		
Rodovia dos Imigrantes (SP-160) Trechos construídos em 1974 Tráfego médio diário de 20.235 veículos		
Situação após 21 anos de serviço (1998)		
Asfáltico	Concreto	
Manutenção anual contínua	Manutenção anual desprezível	
Manutenção pesada: duas (em 1981 e 1989)	Manutenção pesada desnecessária	
Conceito atual: RUIM	Conceito atual: MUITO BOM	
Índices de custos por quilômetro (em valor presente, 12% a.a.)		
	Asfáltico	Concreto
Custo de construção	100	109
1º ano	100	100
5º ano	112	100
10º ano	106	100
15º ano	116	100
20º ano	113	100
21º ano	116	100

Fonte: Adaptado de PITTA, 1998.

Carvalho (2007) informa que com o desenvolvimento de novas tecnologias e de novos equipamentos, como as vibroacabadoras de fôrmas deslizantes de alta produtividade e as usinas dosadoras e misturadoras transportáveis de concreto, capazes de permitir a pavimentação de segmentos com até 1,5 km de extensão por dia, o custo inicial ou de construção dos pavimentos de concreto tornou-se

extremamente competitivo. Isso se deve ao fato de o custo final da alternativa de concreto - custo de construção mais custo anual de manutenção – tem sido muito inferior ao de alternativas de pavimentação.

A Figura 20 mostra um caso real de análise econômica de alternativas de pavimentação, relativa a uma obra executada em São Paulo, em 1998. Quando se calcula o Valor Presente (VP) do investimento, em reais (custo de construção e o de manutenção), pode-se perceber que o custo final do pavimento de concreto é 61% inferior ao de alguma alternativa.



Figura 20 – Análise econômica de alternativas de pavimentação
Fonte: ABCP citada por CARVALHO, 2007.

No mesmo foco, a Revista 'O Empreiteiro' (1995) publicou reportagem à página 31 citando o caso de obra da Av. Presidente Faria, em Curitiba, executada em 1995. Naquela época, o custo de construção do pavimento de concreto ficou 40% mais barato do que a alternativa inicialmente prevista. A entrevista se baseou em declarações do Eng^o. Saburo Ito, então superintendente da Secretaria Municipal de Obras Públicas da Prefeitura de Curitiba, sobre os custos da obra (R\$ 1.3 milhão – asfalto; R\$ 800 mil – concreto). Ao invés dos usuais 1,80m de escavação, o pavimento rígido permitiu uma profundidade de apenas 0,70m. O tempo de pavimentação foi sensivelmente reduzido: se fosse asfáltico, demandaria 5 meses, ao contrário dos 38 dias, e 2.000 viagens de caminhão dentro da cidade deixaram de ocorrer, liberando o trânsito. (CARVALHO, 2007).

O autor supracitado afirma que o custo total rodoviário não se refere apenas ao custo de construção, manutenção e operação da rodovia, mas também aos custos dos usuários, relacionados a acidentes, tempo de viagem, poluição e custo operacional dos veículos, de acordo com os critérios do Banco Mundial, mostrado na Figura 21.



Figura 21 – Composição do custo rodoviário total, segundo o Banco Mundial
 Fonte: ABCP citada por Carvalho, 2007, p.10.

Carvalho (2007) ressalta que a condição funcional de uma rodovia influi significativamente no Custo Operacional dos Veículos (COV). Desta maneira, uma rodovia com baixo índice de condição funcional, ou seja, muito irregular, avaliada pelo *International Roughness Index (IRI)* ou *Índice de Irregularidade Internacional*, promove aumento do custo operacional dos veículos que circularão sobre ela. Como a variação da condição funcional do pavimento de concreto é muito pequena ao longo do período de utilização, o custo operacional da frota circulante sobre ele é muito menor do que aquele previsto para outra alternativa de pavimentação.

Essa redução no custo operacional dos veículos é claramente mostrada pelo Prof. Felipe A. A. Domingues, da USP, em seu trabalho “O pavimento de concreto na redução do Custo Brasil”, datado de 1995 e citada por Carvalho (2007). Segundo o professor, o Custo Operacional dos Veículos (COV) pode atingir até 8 a 10 vezes o custo suportado pelos Órgãos Públicos e Concessionárias.

Da mesma maneira, o modelo de gerência rodoviária adotado e divulgado pelo Banco Mundial, denominado HDM-4 (*Highway Development and Management Tools*), utilizado em cerca de 100 países, contempla o custo total rodoviário (custo social) em sua análise econômica, tanto no nível de projeto quanto no nível de rede.

O Brasil pode ser definido como um país rodoviário, em virtude do fato de que o transporte rodoviário é responsável pela movimentação de 95% dos passageiros e 60% das cargas transportadas. A malha viária brasileira possui mais de 1.700.000 km de extensão (FIG.22).

REDE RODOVIÁRIA NACIONAL (km)

Rodovias	Pavimentadas	Não Pavimentadas	Total
Federais	56.139	14.484	70.623
Estaduais	91.892	116.126	208.018
Municipais	16.994	1.429.296	1.446.290
TOTAL	165.025	1.559.906	1.724.931

Fonte: DNIT - 2003

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE CIMENTOS PORTLAND OPC-M 1 / 8

Figura 22 – Malha rodoviária brasileira

Fonte: DNIT, 2003, citado Carvalho, 2007, p.11.

Apenas 165.000 km são pavimentados, ou seja, menos de 10%, conforme mostra a Figura 22 acima.

Nesta pesquisa, o foco se dirige a pavers, peças pré-moldadas de concreto destinadas à pavimentação intertravada, amplamente utilizada nos países de primeiro mundo.

Após a Segunda Guerra Mundial, a reconstrução da Europa estimulou a substituição dos originários blocos de argila por peças de concreto. Pode-se dizer que assim se construiu o primeiro pavimento de peças pré-moldadas.

No Brasil, essa técnica surgiu nos anos 70, mas sua aplicação muitas vezes não obedeceu aos critérios técnicos mínimos necessários, prejudicando a imagem dos

blocos de concreto para a pavimentação. Enquanto isso, em diversos outros países, cresceu o emprego do pavimento com peças pré-moldadas de concreto, notando-se grande desenvolvimento nas técnicas de dimensionamento, construção, materiais e também na normalização (PAVERTECH, 2009).

A inexistência de limites quanto à capacidade de suporte do pavimento, aliada às muitas opções de formato, padrões, cores e matizes disponíveis para permitir infindáveis possibilidades estéticas assegura à pavimentação êxito absoluto em praças, parques, jardins, calçadas, estacionamentos, vias urbanas, pátios, depósitos, galpões industriais, estradas, acostamentos, entre outros (FIORITTI et al., 2006).

Conforme Piorotti (1985), a vida útil do pavimento pré-moldado de concreto é bastante elevada. Considerando projetos apropriados para sub-base, blocos de boa qualidade e adequado assentamento, pode-se ter uma pavimentação com vida útil de pelo menos 25 anos. Os blocos para pavimentos, também chamados de *pavers* ou 'pavimentos intertravados de concreto', apresentam deformação vertical bem inferior quando comparados com pavimentos flexíveis (pavimentos asfálticos) da mesma espessura (QUADRO 3).

Os pavimentos intertravados são compostos por peças pré-moldadas de concreto e constituem eficaz solução para uso em ruas, calçadas, calçadões e praças, estando esse mercado em crescimento no Brasil, tanto na construção como na reconstrução e reabilitação desse tipo de instalação urbana. Possuem a habilidade de transferir cargas e tensões sobre grandes áreas de pavimentação através da criação de *bridging* (efeito ponte) entre as peças individuais. Esse espalhamento de cargas permite tráfego mais pesado sobre uma sub-base que normalmente requereria um concreto armado com reforço de aço (PBC COMPANIES, 2007).

Outras vantagens da pavimentação intertravada são citadas por Oliveira e Souza (2007): quando adequadamente instalados, os pavimentos resistem à sua movimentação, afundamento ou quebra, possibilitando, dessa forma, que se tenha uma excelente superfície para caminhar, andar de bicicleta, promover trânsito de carros, caminhões, e até mesmo de empilhadeiras industriais. O emprego de peças furadas é ecologicamente correto, pois os furos permitem o retorno das águas de

chuva para o solo, evitando sua perda com o escoamento; favorecem marcas permanentes em estacionamentos, em cruzamentos de pedestres, pistas de tráfegos e outras áreas que necessitam de identificação; possuem manutenção simplificada, pois as peças do pavimento são recolocadas nos seus locais originais após o reparo, sem necessidade de outras adicionais.

Nos pavimentos intertravados em redes subterrâneas de água e de esgoto, o procedimento adotado para a execução de reparos é muito simples e fácil, pois basta remover as peças da área afetada para que os problemas ou danos sejam corrigidos, seguidos da recolocação das peças. Tudo é feito sem a necessidade de equipamentos especiais (FIORITTI et al., 2006).

Na perspectiva da Copel (2009), os principais benefícios da aplicação do pavimento intertravado com pavers de concreto tanto para o tráfego de pessoas como para veículos pesados são:

- Permeabilidade e conforto térmico: harmonia com o meio-ambiente.
- Utilização imediata: liberação para o tráfego logo após sua aplicação.
- Facilidade de manutenção: as peças podem ser removidas e reutilizadas.
- Segurança: a superfície do paver é antiderrapante.
- Versatilidade arquitetônica: vários modelos, cores e combinações.
- Fácil assentamento: com equipamentos de pequeno porte ou até manual
- Durabilidade: altamente resistente ao clima e a agentes agressivos

A norma brasileira NBR 9781 (ABNT, 1987) – ‘Peças de Concreto para Pavimentação – Especificação’ define uma peça de concreto pré-moldado para pavimentação como sendo uma peça de formato geométrico regular, com comprimento máximo de 400 mm, largura mínima de 100 mm e altura mínima de 60 mm. Define, ainda, o comprimento como sendo a maior distância entre duas faces paralelas entre si e perpendiculares aos planos de topo e base. A largura como a menor distância entre duas faces paralelas entre si e perpendiculares aos planos de topo e base e a altura, como a distância entre dois planos paralelos nos quais estão contidos o topo (superfície de rolamento) e a base. São fabricados com diferentes formas, texturas e cores.

O Quadro 8 apresenta a comparação do piso intertravado com o asfalto e o paralelepípedo.

Quadro 8 – Comparação entre tipos de pavimentação

CARACTERÍSTICAS	Intertravado	Asfalto	Paralelepípedo
Durabilidade ilimitada	X	-	X
Baixo custo com obras subterrâneas	X	-	X
Removível e reaproveitável	X	-	X
Dispensa equipamentos caros, especiais e barulhentos para sua remoção	X	-	X
Dispensa manutenção periódica	X	-	-
Dispensa capina periódica	X	X	-
Insensível a agentes químicos	X	-	X
Não sujeito a trincas por fenômenos de dilatação, retração, flexão e oxidação	X	-	X
Tem duas faces de uso	X	-	X
Boa velocidade de aplicação	X	X	-
Dispensa mão de obra especializada para sua aplicação	X	-	X
Dispensa equipamentos caros e especiais para a sua aplicação	X	-	X
Dispensa betume para rejuntamento	X	X	-
Não é perecível, é estocável	X	-	X
Confortável e adequado ao trânsito veloz de veículos modernos	X	X	-
Antiderrapante	X	-	-
Proporciona trânsito silencioso e isento de vibrações	X	X	-
Cor clara, proporcionando maior eficiência da iluminação pública e melhor visibilidade	X	-	-
Não aquece o ambiente	X	-	-
Confortável ao trânsito de pedestres	X	X	-
Confortável ao trânsito de patins, skates, bicicletas e cadeira de rodas	X	X	-
Satisfaz necessidades estáticas	X	-	X
O próprio pavimento possibilita demarcação ou decoração indelével	X	-	-
É intertravado	X	-	-
Redistribui cargas estáticas e dinâmicas	X	X	-
ASPECTOS POSITIVOS – PONTUAÇÃO FINAL	25	08	11

Fonte: INTERPAVI, 2005; 2007; UNI-STEIN, 2005.

Considerados brevemente os aspectos históricos e teóricos deste estudo, o próximo capítulo se refere ao programa experimental da utilização de rejeitos de *sinter feed* como agregado ao concreto para fins de pavimentação.

3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 – Etapas da Pesquisa

O planejamento do presente estudo foi concebido e desenvolvido em duas etapas bem definidas.

A primeira, etapa de caracterização do rejeito, constituída pelos procedimentos iniciais da pesquisa, teve como foco principal os estudos básicos para o conhecimento do material e uma avaliação preliminar sobre a viabilidade do emprego do rejeito como agregado em argamassa de cimento e seu desempenho como tal. O teste inicial, em argamassa, ocorreu por mera conveniência executiva, realizado em laboratório com quantidades reduzidas do rejeito e utilizando-se corpos de prova moldados de pequena dimensão.

Nessa etapa, foi estabelecido o critério de amostragem do rejeito e sua coleta, bem como procedidos os ensaios tecnológicos, físicos e químicos necessários a uma conveniente e adequada caracterização. Para concluir a primeira etapa, foi realizado um teste comparativo de desempenho entre as argamassas de rejeito e de areia lavada, utilizando o cimento Portland como aglomerante, por meio do ensaio de resistência a compressão axial.

Os primeiros resultados de desempenho do agregado em testes de resistência à compressão, a partir de corpos de prova de argamassa de Ø 5 x 10 cm, constituíram premissa satisfatória para a ampliação e desenvolvimento do trabalho, com vistas à consecução dos objetivos estabelecidos.

Ainda na primeira etapa foram desenvolvidos procedimentos e ensaios visando obter informações relativas à microestrutura da argamassa utilizando o material.

A segunda etapa, considerada a de produção dos bloquetes, teve como foco verificar o desempenho do concreto produzido com o material em uma situação efetiva de produção industrial de elementos pré-fabricados de concreto para pavimentação.

Pelo interesse demonstrado no trabalho e pelos padrões de qualidade que apresentou em sua produção, foi selecionada a empresa IBEC - Artefatos de Concreto, que tem seu parque industrial sediado em Matozinhos / MG, como a indústria parceira neste trabalho e responsável pela produção das peças de referência que, posteriormente, foram amostradas e encaminhadas para os ensaios de desempenho.

Um dos interesses inicialmente manifestados pela IBEC no desenvolvimento da presente pesquisa refere-se também à produção piloto de peças para aplicação e acompanhamento, do “Projeto de Comunidade Auto-sustentável e Ecologicamente Correta”, junto à Fazenda Modelo em Pedro Leopoldo/MG.

Uma vez definido o parceiro encarregado pela produção das peças, foram feitos os levantamentos dos parâmetros utilizados em sua produção para os elementos de pavimentação, direcionados para os bloquetes pré-fabricados de concreto, o Paver 8, tais como, os traços, materiais, aditivos, quantidade de água, tempos de moldagem em vibro-prensa, cura, etc., conforme descrito adiante no item 3.4, página 76.

O Paver 8 é um bloquete retangular intermediário na linha de produção, que tem dimensões de 10 x 20 x 8 cm. Existem ainda o Paver 6 e o Paver 10, com alturas respectivas de 6 e 10 cm. A Figura 23 ilustra o Paver 8, escolhido para o desenvolvimento do presente trabalho, numa fase durante o seu processo de produção.



Figura 23 – Vista de algumas peças convencionais do Paver 8
Fonte: Arquivo pessoal, 2008.

Os produtos da empresa, em sua produção normal e regularmente oferecidos ao mercado, foram considerados como paradigma para as referências e conclusões alcançadas no presente trabalho.

Uma eventual necessidade ou conveniência de ajustes tecnológicos nos parâmetros de dosagem e moldagem das peças, tais como fator água/cimento; fator água/mistura seca; consumo de cimento e ajuste fino da mescla, o que ultrapassaria os objetivos deste trabalho, será objeto apenas quando do estabelecimento de uma produção continuada com o efetivo emprego do rejeito de *sinter feed* como agregado na produção do concreto.

A premissa para esse estágio da pesquisa estabeleceu, exclusivamente, a substituição, de parcial a total, dos agregados utilizados correntemente na indústria de concreto pelo rejeito em estudo, mantendo-se constantes os demais parâmetros rotineiros de produção estabelecidos pela IBEC.

Depois de produzidas as primeiras peças com o emprego do rejeito, foram extraídas amostras e submetidas aos ensaios físicos preconizados pela ABNT, bem como outras verificações que pudessem agregar informações pertinentes aos objetivos do presente trabalho.

3.2 – Metodologia

3.2.1 – Primeira etapa

Para a primeira etapa da pesquisa foi estabelecido como metodologia a seguinte seqüência de procedimentos de laboratório:

a) Amostragem:

- Coleta de amostras do rejeito de acordo com as prescrições das normas brasileiras NBR 10007 (ABNT, 2004) e NBR 7216 (ABNT, 2001);

A amostragem realizada do material foi feita em vários pontos das áreas de estocagem do rejeito: no topo; à meia altura e na base das pilhas; na superfície e em pontos mais internos; e em pilhas de diversas idades de formação, de tal forma que

a amostra homogeneizada garantisse a representatividade do rejeito gerado. Todo o material foi acondicionado em sacos plásticos apropriados e vedados.

b) Caracterização do rejeito:

Parte da amostra foi submetida à secagem, quarteamentos sucessivos e moagem até a condição adequada à produção de amostra para os ensaios mineralógicos seguintes:

- Preparo e moagem de amostra do rejeito para caracterização mineralógica por difração de raios-X;
- Preparo de secções polidas e lâminas, em corpo de prova de argamassa, para Análise de Microscopia Ótica;

O restante do material foi direcionado, em seu estado natural, para os demais ensaios que não requeriam beneficiamento adicional, a saber:

- Verificação da reatividade potencial, álcali-agregado, de acordo com a norma NBR 9774 (ABNT, 1987);
- Ensaio acelerado de durabilidade do agregado – (*Soundness Test*) de acordo com o método DNER ME-8994;
- Determinação da composição granulométrica do agregado de acordo com a norma NBR 7217 (ABNT, 2003);
- Determinação da massa unitária de acordo com a norma NBR 7251 (ABNT, 1982);
- Determinação da massa específica de acordo com a norma NBR 9776 (ABNT, 1987);
- Determinação do coeficiente de vazios do agregado solto NBR NM 45 (ABNT 2005);
- Determinação do teor de argila em torrões de acordo com a norma NBR 7218 (ABNT, 1987);
- Determinação do teor de materiais pulverulentos de acordo com a norma NBR 7219 (ABNT, 2003);
- Determinação do teor de impurezas orgânicas de acordo com a norma NBR 7220 (ABNT, 2001);

- Ensaio de qualidade do agregado miúdo de acordo com a norma NBR 7221 (ABNT, 1987);

c) Caracterização ambiental:

- Obtenção do extrato lixiviado do resíduo de acordo com a norma NBR 10005 (ABNT, 2004);
- Obtenção do extrato solubilizado do resíduo de acordo com a norma NBR 10006 (ABNT, 2004);
- Classificação do resíduo sólido de acordo com a norma NBR 10004 (ABNT, 2004);

Com base nos resultados obtidos nos referidos ensaios e sua análise procurou-se concluir sobre a viabilidade do emprego do material como agregado para o concreto, considerando-se a destinação objetivada.

A adequabilidade e refinamento do seu emprego, obtidos através da determinação do traço ideal, do ajuste da mescla granulométrica mais conveniente, eventuais correções de finos e do diâmetro máximo do agregado, entre outros, são fatores facilmente obtidos através das práticas de ajuste de produção. As experiências anteriores realizadas (Jd Canadá) de produção dos pré-moldados com material semelhante e suas aplicações descritas são uma demonstração efetiva desta realidade.

3.2.2 – Segunda etapa

Para a segunda etapa da pesquisa estabeleceu-se como metodologia a seguinte sequência de procedimentos:

- a) Determinação da mescla granulométrica do agregado do traço utilizado pela IBEC;
- b) Definição dos traços de concreto a serem produzidos com o rejeito;
- c) Produção dos bloquetes com as alternativas de traço previstas;
- d) Caracterização e propriedades dos bloquetes:
 - Determinação dimensional NBR 9781 (ABNT, 1987);

- Determinação da resistência à compressão NBR 9780 (ABNT, 1987) para amostras dos traços ensaiados;
- Determinação da absorção de água para as amostras dos traços ensaiados (por aproveitamento da norma NBR 12.118 (ABNT, 2006));
- Determinação do desgaste por abrasão NBR 12.042 (ABNT, 1992) para as amostras dos traços ensaiados.

3.3 – Informações e parâmetros de referência da produção corrente da empresa de fabricação dos bloquetes de concreto (IBEC)

A indústria IBEC tem seu parque industrial localizado no município de Matozinhos, Minas Gerais, às margens da rodovia MG-424, no km 20. Em suas linhas de produção a indústria atende às demandas de blocos de concreto estruturais e de vedação nas diversas formas e dimensões, bloquetes de concreto para pavimentação intertravada em variadas formas e alturas e também meio-fios.

Especificamente em relação à sua linha de bloquetes para pavimentação, a IBEC opera com uma vibroprensa da marca Trillor, modelo MBX-975, hidráulica, automática, Multibloc. A Figura 24 mostra uma vista do referido equipamento.



Figura 24 – Vista da vibro-prensa Trillor
Fonte: Arquivo pessoal, 2008.

Em sua produção dos bloquetes, independentemente do tipo, forma e altura, são utilizados os seguintes materiais:

- Areia média quartizosa lavada, proveniente de Inhaúma/MG;
- Pó de pedra calcária, proveniente de Pedro Leopoldo/MG;
- Brita 0 calcárea, proveniente de Pedro Leopoldo/MG;
- Cimento Portland CP V - ARI, proveniente de Pedro Leopoldo/MG;
- Aditivo plastificante, de base surfactante, indicado para blocos de concreto.

Os agregados utilizados pela indústria apresentaram (em duas coletas realizadas por ocasião dos levantamentos e análises necessários ao presente trabalho) as seguintes características, conforme os Quadros 9 a 12.

Quadro 9 – Caracterização do agregado miúdo - Areia

GRANULOMETRIA DA AREIA - NORMA ABNT NBR 7211					
INFORMAÇÕES GERAIS			ANÁLISE GRANULOMÉTRICA		
AGREGADO	01	02	Peneira	% Retida Acumulada	
MATERIAL:	Areia Lavada	Areia Lavada	(mm)	Amostra 01	Amostra 02
NATUREZA:	Quartzosa	Quartzosa	9,50	0,0	0,0
PROCEDÊNCIA:	laúma - 28/3/08	laúma - 23/5/08	6,30	0,8	1,8
PROPRIETÁRIO:	Ibec	Ibec	4,75	1,5	2,2
UTILIZAÇÃO:	Argam./Concr.	Argam./Concr.	2,36	5,4	5,9
IMP. ORGÂNICA:	< =300 ppm	< = 300 ppm	1,18	17,0	19,0
ARG. EM TORRÕES:	0%	0%	0,60	41,2	45,0
MAT. PULVERULENTO:			0,30	68,5	70,0
MASSA UNITÁRIA	1,359 Kg/dm ³	1,361 Kg/dm ³	0,15	99,8	99,7
MOD. DE FINURA	2,342	2,436	fundo	100	100
ESPECIFICAÇÃO	PERCENTAGENS RETIDAS ACUMULADAS				
	PENEIRAS	FAIXA ÓTIMA		FAIXA UTILIZÁVEL	
ABNT NBR 7211	(mm)	Inferior	Superior	Inferior	Superior
	9,5	0,0	0,0	0,0	0,0
	6,3	0,0	0,0	0,0	7,0
	4,75	0,0	5,0	0,0	10,0
	2,36	10,0	20,0	0,0	25,0
	1,18	20,0	30,0	5,0	50,0
	0,6	35,0	55,0	15,0	70,0
	0,3	65,0	85,0	50,0	95,0
	0,15	90,0	95,0	85,0	100,0
CURVAS GRANULOMÉTRICAS					
% RETIDAS ACUMULADAS					
<p>O gráfico apresenta um eixo horizontal logarítmico para 'PENEIRAS (mm)' variando de 0,0 a 100,0, e um eixo vertical linear para '% Retida Acumulada' variando de 0 a 100. Duas curvas de amostras (01 em vermelho e 02 em azul) são plotadas, mostrando uma distribuição granulométrica que se encaixa quase totalmente dentro da faixa ótima (linha verde) e utilizável (linha magenta).</p>					
<div style="display: flex; justify-content: center; gap: 20px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> — Faixa Ótima </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> — Faixa Utilizável </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> —●— Amostra 01 </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> —●— Amostra 02 </div> </div>					
Observações:					
As curvas granulométricas das amostras 01 e 02 apresentam razoável regularidade granulométrica e encontram-se quase que totalmente contidas na faixa ótima de emprego da ABNT.					

Quadro 10 – Caracterização do Pó de Pedra

GRANULOMETRIA DO PÓ - NORMA ABNT NBR 7211					
INFORMAÇÕES GERAIS			ANÁLISE GRANULOMÉTRICA		
AGREGADO	01	02	Peneira (mm)	% Retida Acumulada	
				Amostra 01	Amostra 02
MATERIAL:	Pó	Pó	9,50	0,0	0,0
NATUREZA:	Calcário	Calcário	6,30	0,4	0,2
PROCEDÊNCIA:	Borges - 28/3/08	Borges - 23/5/08	4,75	10,0	5,4
PROPRIETÁRIO:	Ibec	Ibec	2,36	42,0	34,0
UTILIZAÇÃO:	Argam./Concr.	Argam./Concr.	1,18	59,7	51,8
IMP. ORGÂNICA:			0,60	68,8	61,9
ARG. EM TORRÕES:	0%	0%	0,30	74,5	68,4
MAT. PULVERULENTO:			0,15	99,7	99,6
MASSA UNITÁRIA	1,295 Kg/dm ³	1,305 Kg/dm ³	0,15	99,7	99,6
MOD. DE FINURA	3,551	3,213	fundo	100	100

CURVAS GRANULOMÉTRICAS	
% RETIDAS ACUMULADAS	
<div style="display: flex; justify-content: center; gap: 20px;"> ● Amostra 01 ● Amostra 02 </div>	

Observações:

Pode-se considerar que as amostras 01 e 02 apresentam razoável regularidade granulométrica.

Quadro 11 – Caracterização do agregado graúdo - Brita

GRANULOMETRIA DAS BRITAS - NORMA ABNT NBR 7211					
INFORMAÇÕES GERAIS			ANÁLISE GRANULOMÉTRICA		
AGREGADO	01	02	Peneira	% Retida Acumulada	
MATERIAL:	Brita 0	Brita 0	(mm)	Amostra 01	Amostra 02
NATUREZA:	Calcária	Calcária	9,50	0,0	0,0
PROCEDÊNCIA:	Borges - 28/3/08	Borges - 23/5/08	6,30	24,9	76,5
PROPRIETÁRIO:	Ibec	Ibec	4,75	60,5	87,8
UTILIZAÇÃO:	Argam./Concr.	Argam./Concr.	2,36	93,6	97,6
IMP. ORGÂNICA:			1,18	95,9	98,4
ARG. EM TORRÕES:	0%	0%	0,60	96,6	98,6
MAT. PULVERULENTO:			0,30	96,8	98,7
MASSA UNITÁRIA	1,417 Kg/dm ³	1,437 Kg/dm ³	0,15	99,8	99,8
MOD. DE FINURA	5,681	6,574	fundo	100	100

CURVAS GRANULOMÉTRICAS	
% RETIDAS ACUMULADAS	
<div style="display: flex; justify-content: center; gap: 20px;"> ● Amostra 01 ● Amostra 02 </div>	

Observações:
Pode-se considerar que as amostras 01 e 02 apresentam razoável regularidade granulométrica.

Na dosagem do concreto utilizado em sua produção corrente, o cimento é medido em peso e os agregados são medidos em volume, cuja unidade é exatamente o conteúdo de uma girica convencional. Na Figura 25 podem ser visualizados um instante das atividades produtivas da fábrica e as giricas de agregados aguardando o momento do abastecimento da caçamba da vibroprensa.



Figura 25 – Vista das giricas utilizadas como unidade de medida na indústria
Fonte: Arquivo pessoal, 2008.

O traço do concreto utilizado na produção dos bloquetes, por betonada alimentada, compõe-se de:

- 2 giricas de areia, aproximadamente 400 kg;
- 1 girica de pó de pedra, aproximadamente, 200 kg;
- 1 girica de brita 0, aproximadamente, 200 kg;
- 160 kg de cimento;
- 59 litros de água e
- 5 litros de solução do aditivo plastificante, composta por 20 litros do concentrado em 180 litros de água ($\approx 3\%$ sobre o peso do cimento).

Desta forma, o fator água/cimento calculado equivale a 0,397.

Esta mistura é processada e tem a sua água controlada por sensores internos no misturador, de tal forma que a umidade da mesma se situe na faixa de 6,5 a 7,0 % no máximo, incluindo-se aí a umidade natural apresentada pela areia.

Considerando a dosagem anteriormente descrita a mescla granulométrica dos agregados do traço utilizado apresenta-se conforme o Quadro 12, onde a granulometria calculada de cada agregado foi obtida pela média dos valores respectivos das datas consideradas:

Quadro 12 – Mescla granulométrica dos agregados utilizados na produção do bloquete IBEC

ESTUDO DE MESCLA GRANULOMÉTRICA							
AGREGADO n.º:	1	2	3	4			
MATERIAL:	Areia	Pó	Brita 0				
NATUREZA:	quartzosa	calcário	calcária				
PROCEDÊNCIA:	laúma	Borges	Borges				
PROPRIETÁRIO:	Ibec	Ibec	Ibec				
UTILIZAÇÃO:	concreto / argamassa	concreto / argamassa	concreto / argamassa				
IMP. ORGÂNICA:							
ARG. EM TORRÕES:							
MAT. PULVERULENTO:							
COEF. DE VAZIOS:							
MOD. DE FINURA							
Granulometria ABNT NBR-7211	Pen.(mm)	% Ret. Acum. [1]	% Ret. Acum. [2]	% Ret. Acum. [3]	Mescla de Refer.		Mescla Bloquete
	25						-
	19						-
	9,5						-
	6,36	1,30	0,30	50,70			13,40
	4,8	1,85	7,70	74,15			21,39
	2,4	5,65	38,00	95,60			36,23
	1,2	18,00	55,75	97,15			47,23
	0,6	43,10	65,35	97,60			62,29
	0,3	69,25	71,45	97,75			76,93
	0,15	99,75	99,65	99,80			99,74
	Fundo	100,00	100,00	100,00			100,00
	% do agregado na mescla (em volume)	50	25	25			Ø máx. 9,50

Mescla Granulométrica

A sequência de operações, uma vez alimentado o misturador da vibroprensa, constitui-se em:

1. Descarga e vibroprensagem do concreto nas respectivas fôrmas, a uma pressão aproximada de 90 bar, por um período de 5 a 7 segundos;
2. Transporte da bandeja ao gaveteiro, para repouso por 24 horas;

3. Paletização dos pré-fabricados para destino às áreas de cura (câmara úmida ou pátio de molhação) por um período de 7 dias;
4. Transferência do produto acabado, paletizado, para a área de estoque.

As Figuras 26 a 31 ilustram cada uma das operações descritas.



Figura 26 – Momento da saída dos bloquetes na vibro-prensa
Fonte: Arquivo pessoal, 2008.



Figura 27 – Sequência de bandejas de bloquetes na saída da vibro-prensa
Fonte: Arquivo pessoal, 2008.



Figura 28 – Gaveteiro com bandejas de bloquetes recém produzidos
Fonte: Arquivo pessoal, 2008.



Figura 29 – Sequência de gaveteiros em repouso por 24 horas
Fonte: Arquivo pessoal, 2008.



Figura 30 – Vista de uma das câmaras úmidas da empresa
Fonte: Arquivo pessoal, 2008.



Figura 31 – Vista de área externa de cura de bloquetes paletizados
Fonte: Arquivo pessoal, 2008.

Para aferir e controlar a qualidade dos produtos em sua linha de produção, a indústria dispõe de um laboratório de análises físicas, no qual são aferidas as umidades do concreto fresco; realizados os ensaios dimensionais das peças; verificadas suas resistências à compressão e índices de absorção de água nas respectivas idades de referência.

A Figura 32 ilustra parte das instalações de laboratório da fábrica.



Figura 32 – Vista parcial das instalações do laboratório da indústria
 Fonte: Arquivo pessoal, 2008.

Para os bloquetes com concreto convencional foi definida, aleatoriamente, uma data e um horário na jornada de produção da fábrica, da qual foram separadas amostras do Paver 8. Após terem sido processadas conforme a sequência industrial descrita anteriormente, constituíram as peças de referência que foram submetidas aos ensaios de resistência à compressão, de absorção de água e de desgaste por abrasão.

Para os ensaios de resistência à compressão foram separadas 18 peças, constituindo 3 amostras com 6 corpos de prova cada, para rompimento de cada amostra nas idades de 7, 14 e 28 dias, em conformidade com a Norma Brasileira NBR 9781 (ABNT,1987). O cálculo do valor característico da resistência à compressão é realizado através da equação:

$$f_{pk} = f_p - t * s$$

onde:

- f_{pk} = resistência característica à compressão, em MPa;
- f_p = resistência média das peças ensaiadas de acordo com a NBR 9780, em MPa;
- s = desvio padrão da amostra = $\sqrt{\frac{\sum (f_p - f_{pi})^2}{n-1}}$
- f_{pi} = resistência individual das peças ensaiadas de acordo com a NBR 9780, em MPa;
- n = número de peças da amostra (nesse trabalho em número de 6 peças);

- t = coeficiente de Student, que varia em função do número de peças ensaiadas.

O coeficiente de Student adotado neste ensaio, conforme NBR 9781 (ABNT, 1987), foi de 0,920, em função do número de peças ensaiadas em cada idade.

Para o desenvolvimento dos ensaios de resistência à compressão, foi utilizado o laboratório da indústria IBEC, onde as amostras foram capeadas com argamassa comum de cimento e areia e rompidas em uma prensa hidráulica, cap. 100 t, da marca Pavitest, modelo I-3025A, de fabricação da Contenco Ind. e Com. Ltda., conforme estabelece a norma brasileira. A Figura 33 ilustra a área de capeamento do laboratório onde são também realizados os ensaios de resistência à compressão.



Figura 33 – Vista da área do laboratório da IBEC na fase de capeamento dos bloquetes para seu rompimento

Fonte: Arquivo pessoal, 2008.

Para os ensaios de absorção de água foram separadas 3 peças, constituindo 3 amostras, com 1 corpo de prova cada, para análise na idade de 28 dias. Devido a inexistência de norma específica para absorção de água em bloquetes, foram utilizados os princípios da Norma Brasileira ABNT NBR – 12.118, que refere-se a blocos vazados de concreto simples para alvenaria. O cálculo do valor individual da absorção de água de cada amostra foi feito de acordo com a fórmula

$$a = \frac{m_2 - m_1}{m_1} * 100$$

onde:

- a = absorção total em porcentagem;
- m_1 = massa do corpo de prova seco em estufa, em kilogramas;
- m_2 = massa do corpo de prova saturado, em kilogramas.

Para a análise dos resultados calculou-se também a absorção média das 3 amostras ensaiadas.

Para o desenvolvimento do ensaio de absorção foi utilizado o Laboratório de Concreto do DEMC, na Escola de Engenharia da UFMG. Na Figura 34, uma vista da estufa elétrica utilizada para a secagem das amostras ensaiadas do Paver 8.



Figura 34 – Vista da estufa elétrica utilizada na secagem das peças
Fonte: Arquivo pessoal, 2008.

Para os ensaios de desgaste por abrasão foram separadas 4 peças, constituindo 2 amostras, com 2 peças cada, para análise na idade de 28 dias. De cada peça foi preparado, por meio de cortes feitos no concreto com discos de corte diamantados, um corpo de prova cúbico, com dimensões aproximadas de 6cm x 6cm x 8cm. Um par de cubos constituiu a amostra 1 com os 2 cp's, CP1a e CP1b. O segundo par constituiu a amostra 2, com os 2 cp's, CP2a e CP2b. Devido a inexistência de norma específica para aferir o desgaste por abrasão em bloquetes, foram utilizados princípios da Norma Brasileira ABNT NBR – 12.042, que refere-se a determinação do desgaste por abrasão de materiais inorgânicos, com uma adaptação conveniente de mensuração dos desgastes por perda de peso. Foram medidos os desgastes parciais, correspondentes a 250 voltas do disco abrasivo, equivalente a 500 m, e o

desgaste total, correspondente a 500 voltas do disco abrasivo, equivalente a 1000m. Em ambos os estágios os valores absolutos dos desgastes foram expressos em perda de massa dos corpos de prova, calculados pela fórmula

$$d = \frac{m_i - m_0}{m_0} * 100$$

onde:

- d = desgaste expresso em percentual de perda de massa;
- m_i = massa do corpo de prova após estágio parcial ou total, em gramas;
- m_0 = massa inicial do corpo de prova, em gramas.

Para a análise dos resultados calculou-se também o desgaste médio apresentado pelos 4 corpos de prova após o estágio final, de 500 voltas do disco abrasivo.

Para o desenvolvimento do ensaio de desgaste por abrasão foi utilizado o Laboratório de Concreto do DEMC, da Escola de Engenharia da UFMG, onde as amostras foram faceadas e preparadas conforme estabelece a norma brasileira. A Figura 35 ilustra o equipamento utilizado no ensaio, o Abrazímetro Amsler da marca Pavitest, de fabricação da Contenco Ind. e Com. Ltda., durante a execução de um dos respectivos testes.



Figura 35 – Vista do aparelho de ensaio de desgaste por abrasão
Fonte: Arquivo pessoal, 2008.

Os resultados dos referidos ensaios constam dos Quadros 13 a 15.

Quadro 13 – Resultados de resistência à compressão dos bloquetes de referência da IBEC

		RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - NBR 9781						
INFORMAÇÕES GERAIS	PEÇA	Paver 6		Paver 8		Paver 10		
	MATERIAL			Concreto Convenc.				
	INDÚSTRIA			IBEC				
	FINALIDADE			Teste				
	INTERESSADO			Ayrton				
	PESO MÉDIO (Kg)			3,393				
	DIMENSÃO NOMINAL (mm)			200 x 100 x 80				
	DIMENSÃO MÉDIA (mm)			198 x 98 x 78				
	DATA FABRICAÇÃO			23/5/2008				
	UTILIZAÇÃO			Pavimento Intertr.				
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (MPa)								
		RESULTADOS DE RESISTÊNCIA						
Corpos de prova de Paver 8		Valores individuais / Valor médio						Resist. Caract.
		1°. Result.	2°. Result.	3°. Result.	4°. Result.	5°. Result.	6°. Result.	
IDADE (em dias)	0	0,00						0,00
		24,50	23,72	19,02	23,83	27,43	19,95	20,22
	7	23,08						20,22
		32,69	34,83	32,40	35,18	31,99	33,45	32,21
	14	33,42						32,21
36,17		36,15	34,50	38,53	36,64	35,18	34,92	
28	36,20						34,92	
CURVAS DE RESISTÊNCIA								
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)								
OBSERVAÇÕES:								

Quadro 14 – Resultados de absorção dos bloquetes de referência da IBEC

ABSORÇÃO DE ÁGUA - NBR 12.118														
INFORMAÇÕES GERAIS	PEÇA	Paver 6	Paver 8	Paver 10										
	MATERIAL		Concreto Convenc.											
	INDÚSTRIA		Ibec											
	FINALIDADE		Teste											
	INTERESSADO		Ayrton											
	PESO MÉDIO (Kg)		3,366											
	DIMENSÃO NOMINAL (mm)		200 x 100 x 80											
	DIMENSÃO MÉDIA (mm)		198 x 98 x 78											
	DATA FABRICAÇÃO		23/5/2008											
	UTILIZAÇÃO		Pavimento Intertr.											
ABSORÇÃO DE ÁGUA														
Corpos de Prova de Paver 8		RESULTADOS DE ABSORÇÃO (%)			Absorção Média									
		Medidas dos Pesos (Kg)												
		Peso Seco ao Ar	Peso seco em estufa	Peso Sat. Sup. Seca										
CORPO DE PROVA	CP 1	3,35	3,25	3,45	6,86									
		6,15												
	CP 2	3,30	3,15	3,35										
		6,35												
	CP 3	3,25	3,10	3,35										
		8,06												
Absorção de Água														
<table border="1"> <caption>Data for Absorção de Água Chart</caption> <thead> <tr> <th>Corpos de Prova</th> <th>Absorção (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CP 1</td> <td>6,15</td> </tr> <tr> <td>CP 2</td> <td>6,35</td> </tr> <tr> <td>CP 3</td> <td>8,06</td> </tr> <tr> <td>Média</td> <td>6,86</td> </tr> </tbody> </table>					Corpos de Prova	Absorção (%)	CP 1	6,15	CP 2	6,35	CP 3	8,06	Média	6,86
Corpos de Prova	Absorção (%)													
CP 1	6,15													
CP 2	6,35													
CP 3	8,06													
Média	6,86													
OBSERVAÇÕES:														
Corpos de prova com idades de 28/30 dias														
Peso seco em estufa: após 24 horas de secagem														

Quadro 15 – Resultado do desgaste por abrasão dos bloquetes de referência da IBEC

ENSAIO DE ABRASÃO - NBR 12.042								
INFORMAÇÕES GERAIS	PEÇA	Paver 6		Paver 8		Paver 10		
	MATERIAL			Concreto Convenc.				
	INDÚSTRIA			Ibec				
	FINALIDADE			Teste				
	INTERESSADO			Ayrton				
	PESO MÉDIO (Kg)			3,393				
	DIMENSÃO NOMINAL (mm)			200 x 100 x 80				
	DIMENSÃO MÉDIA (mm)			198 x 98 x 78				
	DATA FABRICAÇÃO			23/5/2008				
	UTILIZAÇÃO			Pavimento Intertr.				
ENSAIO DE DESGASTE POR ABRASÃO								
Corpos de Prova extraídos do Paver 8		RESULTADOS DAS PERDAS DE MASSA (%)						
		250 voltas = 500m			500 voltas = 1000m			500 voltas Perda média
		Massa inic.	Massa final	Dif. Parcial	Massa inic.	Massa final	Dif. Total	
CORPO DE PROVA	CP 1a	704,54	686,65	17,89	704,54	670,76	33,78	
		2,54			4,79			
	CP 1b	658,64	637,61	21,03	658,64	619,66	38,98	
		3,19			5,92			
	CP 2a	671,93	644,27	27,66	671,93	621,02	50,91	
		4,12			7,58			
	CP2b	596,33	578,85	17,48	596,33	551,58	44,75	
		2,93			7,50			
<p style="text-align: center;">DESGASTE POR ABRASÃO</p> <p style="text-align: center;">CORPOS DE PROVA</p>								
OBSERVAÇÕES:								
Corpos de prova extraídos de bloquetes com idade de 28/30 dias								
Massas expressas em g.								

3.4 – A produção das peças com o rejeito de Sinter Feed

Para o desenvolvimento desta pesquisa, dentro dos parâmetros de objetivos estabelecidos, foram definidos os seguintes procedimentos:

1. Inicialmente foi feito um estudo de mesclas granulométricas, tomando-se a da produção de bloquetes da empresa como referência para comparação (pag. 82);
2. Este estudo considerou os condicionantes e conveniências da produção rotineira, onde a unidade de volume de agregado a ser alimentado foi o de uma girica usualmente empregada;
3. A mescla, com o emprego do rejeito, que mais se aproximou da de referência da indústria, constituiu o traço base da pesquisa, considerando-se maior aproximação a maior tendência de superposição ou proximidade das respectivas curvas granulométricas;
4. Outras duas mesclas, imediatamente mais próximas, constituíram o segundo e o terceiro traços da pesquisa e foram estabelecidos apenas para efeito de composição dos estudos e comparação de resultados;
5. Os demais parâmetros da produção foram mantidos sem variação na proporção dos traços ensaiados.

O resumo das mesclas estudadas é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3
Mesclas Estudadas

MESCLA 1	100% do rejeito		
MESCLA 2	75% de rejeito	25% de pó de pedra	
MESCLA 3	75% de rejeito	25% de brita 0	
MESCLA 4	75% de rejeito	25% de areia	
MESCLA 5	50% de rejeito	50% de areia	
MESCLA 6	50% de rejeito	25% de areia	25% de pó de pedra

O estudo das referidas mesclas granulométricas constam dos Quadros 16 a 21 a seguir:

Quadro 16 – Comparativo de mescla granulométrica considerando 100% do rejeito de sinter feed

		ESTUDO DE MESCLA GRANULOMÉTRICA					
AGREGADO n.º:		1	2	3	4		
MATERIAL:		Areia	Pó	Brita 0	Rejeito		
NATUREZA:		quartzosa	calcário	calcária	ferro-quartzoso		
PROCEDÊNCIA:		laúma	Borges	Borges	Itaminas		
PROPRIETÁRIO:		Ibec	Ibec	Ibec	Ibec		
UTILIZAÇÃO:		concreto / argamassa	concreto / argamassa	concreto / argamassa	concreto / argamassa		
IMP. ORGÂNICA:							
ARG. EM TORRÕES:							
MAT. PULVERULENTO:							
COEF. DE VAZIOS:							
MOD. DE FINURA							
Granulometria ABNT NBR-7211	Pen.(mm)	% Ret. Acum. [1]	% Ret. Acum. [2]	% Ret. Acum. [3]	% Ret. Acum. [4]	Mescla de Refer.	Mescla Calculada
	25						-
	19						-
	9,5						-
	6,36	1,30	0,30	50,70	2,67	13,40	2,67
	4,8	1,85	7,70	74,15	10,47	21,39	10,47
	2,4	5,65	38,00	95,60	46,64	36,23	46,64
	1,2	18,00	55,75	97,15	80,24	47,23	80,24
	0,6	43,10	65,35	97,60	92,46	62,29	92,46
	0,3	69,25	71,45	97,75	95,29	76,93	95,29
	0,15	99,75	99,65	99,80	96,64	99,74	96,64
	Fundo	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
% do agregado na nova mescla (em volume)		0	0	0	100	Ø máx. 9,50	Ø máx. 6,36
						Mód. Finura 3,57	Mód. Finura 4,24

Mescla Granulométrica

Legenda:
— Mescla de Refer.
— Mescla Calculada

Quadro 17 – Comparativo de mescla considerando 75% do rejeito de sinter feed + 25% de pó de pedra

		ESTUDO DE MESCLA GRANULOMÉTRICA					
AGREGADO n.º:		1	2	3	4		
MATERIAL:		Areia	Pó	Brita 0	Rejeito		
NATUREZA:		quartzosa	calcário	calcária	ferro-quartzoso		
PROCEDÊNCIA:		laúma	Borges	Borges	Itaminas		
PROPRIETÁRIO:		Ibec	Ibec	Ibec	Ibec		
UTILIZAÇÃO:		concreto / argamassa	concreto / argamassa	concreto / argamassa	concreto / argamassa		
IMP. ORGÂNICA:							
ARG. EM TORRÕES:							
MAT. PULVERULENTO:							
COEF. DE VAZIOS:							
MOD. DE FINURA							
Granulometria ABNT NBR-7211	Pen.(mm)	% Ret. Acum. [1]	% Ret. Acum. [2]	% Ret. Acum. [3]	% Ret. Acum. [4]	Mescla de Refer.	Mescla Calculada
	25					-	-
	19					-	-
	9,5					-	-
	6,36	1,30	0,30	50,70	2,67	13,40	2,08
	4,8	1,85	7,70	74,15	10,47	21,39	9,78
	2,4	5,65	38,00	95,60	46,64	36,23	44,48
	1,2	18,00	55,75	97,15	80,24	47,23	74,12
	0,6	43,10	65,35	97,60	92,46	62,29	85,68
	0,3	69,25	71,45	97,75	95,29	76,93	89,33
0,15	99,75	99,65	99,80	96,64	99,74	97,39	
Fundo	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
% do agregado na nova mescla (em volume)		0	25	0	75	Ø máx. 9,50 Mód. Finura 3,57	Ø máx. 6,36 Mód. Finura 4,03

Mescla Granulométrica

Legenda:
— Mescla de Refer.
— Mescla Calculada

Quadro 18 – Comparativo de mescla considerando 75% do rejeito de sinter feed + 25% brita 0

		ESTUDO DE MESCLA GRANULOMÉTRICA					
AGREGADO n°:		1	2	3	4		
MATERIAL:		Areia	Pó	Brita 0	Rejeito		
NATUREZA:		quartzosa	calcário	calcária	ferro-quartzoso		
PROCEDÊNCIA:		laúma	Borges	Borges	Itaminas		
PROPRIETÁRIO:		Ibec	Ibec	Ibec	Ibec		
UTILIZAÇÃO:		concreto / argamassa	concreto / argamassa	concreto / argamassa	concreto / argamassa		
IMP. ORGÂNICA:							
ARG. EM TORRÕES:							
MAT. PULVERULENTO:							
COEF. DE VAZIOS:							
MOD. DE FINURA							
Granulometria ABNT NBR-7211	Pen.(mm)	% Ret. Acum. [1]	% Ret. Acum. [2]	% Ret. Acum. [3]	% Ret. Acum. [4]	Mescla de Refer.	Mescla Calculada
	25						-
	19						-
	9,5						-
	6,36	1,30	0,30	50,70	2,67	13,40	14,68
	4,8	1,85	7,70	74,15	10,47	21,39	26,39
	2,4	5,65	38,00	95,60	46,64	36,23	58,88
	1,2	18,00	55,75	97,15	80,24	47,23	84,47
	0,6	43,10	65,35	97,60	92,46	62,29	93,75
	0,3	69,25	71,45	97,75	95,29	76,93	95,91
0,15	99,75	99,65	99,80	96,64	99,74	97,43	
Fundo	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
% do agregado na nova mescla (em volume)		0	0	25	75	Ø máx. 9,50	Ø máx. 9,50
						Mód. Finura 3,57	Mód. Finura 4,71

Mescla Granulométrica

Legenda:
—●— Mescla de Refer.
—●— Mescla Calculada

Quadro 19 – Comparativo de mescla considerando 75% do rejeito de sinter feed + 25% areia

		ESTUDO DE MESCLA GRANULOMÉTRICA					
AGREGADO n°:		1	2	3	4		
MATERIAL:		Areia	Pó	Brita 0	Rejeito		
NATUREZA:		quartzosa	calcário	calcária	ferro-quartzoso		
PROCEDÊNCIA:		laúma	Borges	Borges	Itaminas		
PROPRIETÁRIO:		Ibec	Ibec	Ibec	Ibec		
UTILIZAÇÃO:		concreto / argamassa	concreto / argamassa	concreto / argamassa	concreto / argamassa		
IMP. ORGÂNICA:							
ARG. EM TORRÕES:							
MAT. PULVERULENTO:							
COEF. DE VAZIOS:							
MOD. DE FINURA							
Granulometria ABNT NBR-7211	Pen.(mm)	% Ret. Acum. [1]	% Ret. Acum. [2]	% Ret. Acum. [3]	% Ret. Acum. [4]	Mescla de Refer.	Mescla Calculada
	25						-
	19						-
	9,5						-
	6,36	1,30	0,30	50,70	2,67	13,40	2,33
	4,8	1,85	7,70	74,15	10,47	21,39	8,32
	2,4	5,65	38,00	95,60	46,64	36,23	36,39
	1,2	18,00	55,75	97,15	80,24	47,23	64,68
	0,6	43,10	65,35	97,60	92,46	62,29	80,12
	0,3	69,25	71,45	97,75	95,29	76,93	88,78
0,15	99,75	99,65	99,80	96,64	99,74	97,42	
Fundo	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
% do agregado na nova mescla (em volume)		25	0	0	75	Ø máx. 9,50	Ø máx. 6,36
						Mód. Finura 3,57	Mód. Finura 3,78

Mescla Granulométrica

Legenda: — Mescla de Refer. (azul), — Mescla Calculada (magenta)

Quadro 20 – Comparativo de mescla considerando 50% do rejeito de sinter feed + 50% areia

ESTUDO DE MESCLA GRANULOMÉTRICA									
AGREGADO n°:		1	2	3	4				
MATERIAL:		Areia	Pó	Brita 0	Rejeito				
NATUREZA:		quartzosa	calcário	calcária	ferro-quartzoso				
PROCEDÊNCIA:		laúma	Borges	Borges	Itaminas				
PROPRIETÁRIO:		lbec	lbec	lbec	lbec				
UTILIZAÇÃO:		concreto / argamassa	concreto / argamassa	concreto / argamassa	concreto / argamassa				
IMP. ORGÂNICA:									
ARG. EM TORRÕES:									
MAT. PULVERULENTO:									
COEF. DE VAZIOS:									
MOD. DE FINURA									
Granulometria ABNT NBR-7211	Pen.(mm)	% Ret. Acum. [1]	% Ret. Acum. [2]	% Ret. Acum. [3]	% Ret. Acum. [4]	Mescla de Refer.		Mescla Calculada	
	25							-	-
	19							-	-
	9,5							-	-
	6,36	1,30	0,30	50,70	2,67	13,40		1,99	
	4,8	1,85	7,70	74,15	10,47	21,39		6,16	
	2,4	5,65	38,00	95,60	46,64	36,23		26,15	
	1,2	18,00	55,75	97,15	80,24	47,23		49,12	
	0,6	43,10	65,35	97,60	92,46	62,29		67,78	
	0,3	69,25	71,45	97,75	95,29	76,93		82,27	
0,15	99,75	99,65	99,80	96,64	99,74		98,20		
Fundo	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00		100,00		
% do agregado na nova mescla (em volume)		50	0	0	50	Ø máx.	9,50	Ø máx.	6,36
						Mód. Finura	3,57	Mód. Finura	3,32

Mescla Granulométrica

Legenda:

- Mescla de Refer.
- Mescla Calculada

Quadro 21 – Comparativo de mescla considerando 50% do rejeito de sinter feed + 25% areia e 25% de pó de pedra

		ESTUDO DE MESCLA GRANULOMÉTRICA					
AGREGADO n°:		1	2	3	4		
MATERIAL:		Areia	Pó	Brita 0	Rejeito		
NATUREZA:		quartzosa	calcário	calcária	ferro-quartzoso		
PROCEDÊNCIA:		laúma	Borges	Borges	Itaminas		
PROPRIETÁRIO:		Ibec	Ibec	Ibec	Ibec		
UTILIZAÇÃO:		concreto / argamassa	concreto / argamassa	concreto / argamassa	concreto / argamassa		
IMP. ORGÂNICA:							
ARG. EM TORRÕES:							
MAT. PULVERULENTO:							
COEF. DE VAZIOS:							
MOD. DE FINURA							
Granulometria ABNT NBR-7211	Pen.(mm)	% Ret. Acum. [1]	% Ret. Acum. [2]	% Ret. Acum. [3]	% Ret. Acum. [4]	Mescla de Refer.	Mescla Calculada
	25						-
	19						-
	9,5						-
	6,36	1,30	0,30	50,70	2,67	13,40	1,74
	4,8	1,85	7,70	74,15	10,47	21,39	7,62
	2,4	5,65	38,00	95,60	46,64	36,23	34,23
	1,2	18,00	55,75	97,15	80,24	47,23	58,56
	0,6	43,10	65,35	97,60	92,46	62,29	73,34
	0,3	69,25	71,45	97,75	95,29	76,93	82,82
0,15	99,75	99,65	99,80	96,64	99,74	98,17	
Fundo	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
% do agregado na nova mescla (em volume)		25	25	0	50	Ø máx. 9,50	Ø máx. 6,36
						Mód. Finura 3,57	Mód. Finura 3,56

Mescla Granulométrica

Legenda:
—●— Mescla de Refer.
—■— Mescla Calculada

Da análise dos estudos de mesclas granulométricas anteriores, considerando inclusive os respectivos módulos de finura, concluiu-se pela adoção dos 3 últimos traços, correspondentes às mesclas 4, 5 e 6, descritos a seguir, correspondentes aos Quadros 19, 20 e 21, que apresentaram curvas granulométricas com maior tendência de aproximação da curva da mescla de referência, ou seja, com módulos

de finura e mesclas granulométricas mais próximos ao do traço utilizado na indústria e tomado como referência:

1. **Traço 1 / mescla 4:** 75% de rejeito + 25% de areia;
2. **Traço 2 / mescla 5:** 50% de rejeito + 50% de areia - *traço cuja mescla granulométrica mais se aproximou da mescla de referencia;*
3. **Traço 3 / mescla 6:** 50% de rejeito + 25% de areia + 25% de pó de pedra.

Com os traços 1, 2 e 3 (estabelecidos conforme descrito) foram produzidos os bloquetes da pesquisa e extraídas as amostras com seus respectivos corpos de prova. Estas amostras foram preparadas e constituíram os corpos de prova que foram ensaiados de forma análoga ao descrito no item 3.3 deste trabalho, às páginas 75-92.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Primeira etapa – caracterização do rejeito

4.1.1 - Difração de Raio-X

O ensaio teve por objetivo identificar qualitativamente as fases mineralógicas presentes na amostra. A caracterização mineralógica do rejeito, realizada por Difratomia de Raios-X, foi executada no Laboratório de Mineralogia e Difratomia de Raios-X do CETEC, em Belo Horizonte, sendo apresentado a seguir o difratograma obtido (FIG.36), no qual foram nominados os picos mais relevantes.

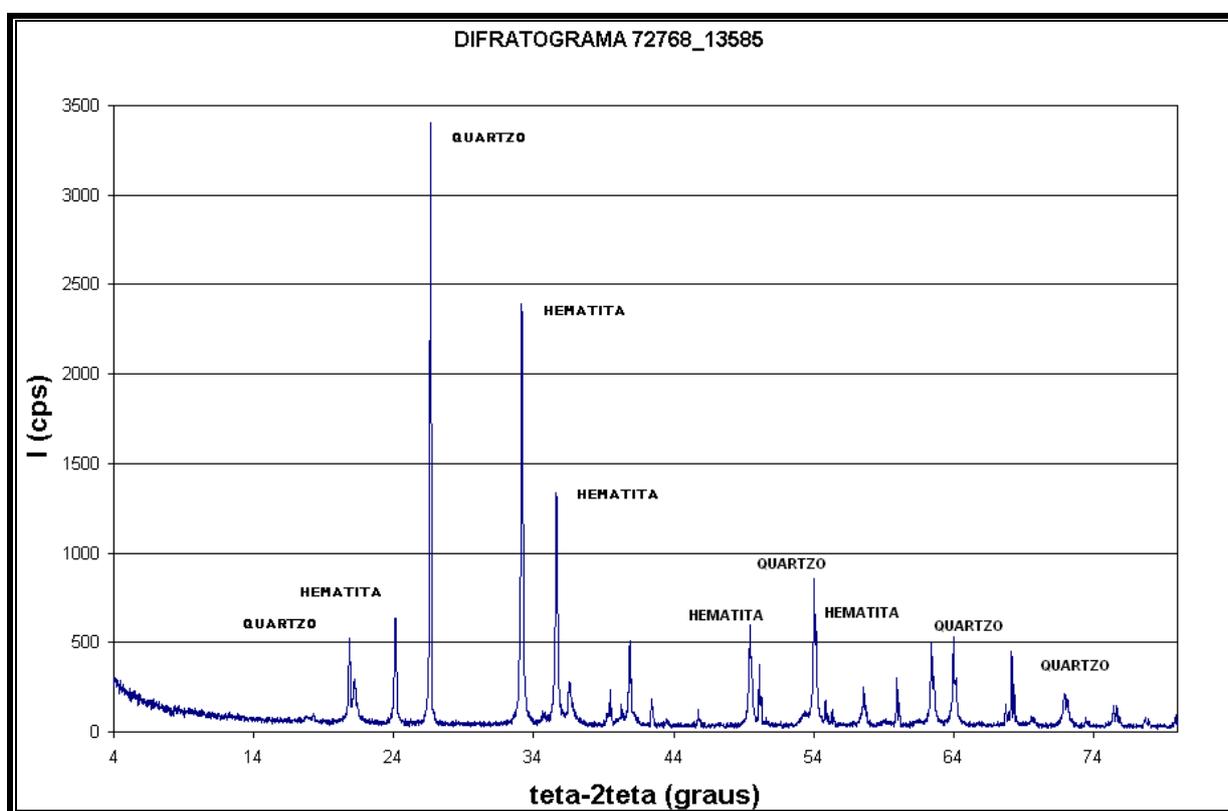


Figura 36 – Difratograma obtido do ensaio de Difratomia de Raios-X de amostra do rejeito
Fonte: CETEC-MG, 2006.

Trata-se de material que apresenta fases cristalinas compostas, em sua maior parte, por hematita (Fe_2O_3) e quartzo (SiO_2).

Apresenta também fases compatíveis com goethita (FeO(OH)), anatásio (TiO_2), fosfato de alumínio (AlPO_4) e óxido de manganês hidratado (MnO(OH)) como menores ou constituintes traços, conforme Anexo 1.

Apresenta ainda limonita ($\text{Fe(OH)}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) em abundância que o Raio-X não detecta. Este rejeito limonítico contém fósforo (P).

4.1.2 - Análise de Microscopia Ótica

A partir de 2 outros corpos de prova moldados da argamassa de cimento e rejeito, referenciada no item 4.1.13 “**Ensaio de qualidade do agregado miúdo / comparativo de resistência**”, foram feitos cortes transversais e preparadas duas secções polidas (uma de cada cp) e uma lâmina (de um dos cp's), para análise por Microscopia Ótica, visando não apenas descrever os minerais presentes, inclusive os que não são cristalinos e não detectados na Difractometria por Raio-X, mas também estabelecer uma quantificação volumétrica dos mesmos (FIG.37 e 38).



Figura 37 – Detalhe da seção de um corpo de prova 5 x 10 cm da argamassa produzida com o rejeito de sinter feed

Fonte: Arquivo pessoal, 2009.



Figura 38 – Detalhe da lâmina montada e das duas seções polidas preparadas
 Fonte: Arquivo pessoal, 2009.

As seções polidas se prestam à análise dos minerais presentes que são opacos e a lâmina àqueles que são transparentes à luz polarizada. Foi utilizado o processo da contagem visual, através de microscópio petrográfico, para cálculo da estimativa mineralógica percentual volumétrica.

Os resultados encontrados constam da Tabela 4.

Tabela 4
Resultado da análise de microscopia ótica nas amostras de argamassa com o rejeito

MINERAL	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	MÉDIA
Hematita	26,61%	22,00%	24,30%
Goethita/limonita	44,96%	37,86%	41,41%
Quartzo	19,74%	38,05%	29,89%
Magnetita	0,25%	0,10%	0,17%
Caulinita	0,78%	0,36%	0,57%
Quartzo misto	7,66%	1,63%	4,66%
Turmalina	(aglomerado de cristais anédricos a subédricos)		raros

Fonte: CETEC-MG, 2006; Dados da pesquisa, 2006.

Os estudos mineralógicos realizados em amostras preparadas do rejeito (difração por raio-x) ou em corpos de prova da argamassa/concreto endurecidos (microscopia ótica) definem a composição predominante do rejeito em **hematita**, **quartzo** e **goethita/limonita**. Os demais elementos apontados não somam 3% nas ocorrências detectadas, todas em óxidos ou fosfatos estabilizados. Na bibliografia consultada não se encontrou qualquer referência específica relativamente a presença dos elementos identificados na constituição deste rejeito, que pode ser classificado, segundo Metha e Monteiro (2006) como agregado pesado.

A respectiva Ficha de Descrição Petrográfica emitida pelo Laboratório de Mineralogia e Microscopia do CETEC consta do Anexo 2.

4.1.3 - Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura

Foram retirados alguns fragmentos nos dois corpos de prova utilizados no ensaio anterior, um com a argamassa do rejeito em estudo e outro em a argamassa de areia comum média, que serviram como referência para a análise comparativa, citada em 4.1.13.

Foram preparadas as amostras com a aplicação de uma camada condutora de carbono na superfície (metalização), necessária à realização do ensaio (FIG.39).



Figura 39 – Fragmentos de argamassa normal e argamassa com rejeito para o ensaio de MEV
Fonte: Arquivo pessoal, 2007.

Através da análise de MEV, em alguns de seus vários níveis de ampliação, foi possível observar a microestrutura das amostras, a morfologia, a cristalização da matriz cimentícia, a formação dos compostos decorrentes da hidratação do cimento e a zona de transição matriz/agregado.

Associado à microscopia de varredura eletrônica foi realizada também em algumas etapas do exame, a análise química qualitativa dos elementos presentes em pontos escolhidos, através do Espectrômetro de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS).

Os ensaios foram realizados no laboratório de Microscopia Eletrônica do DEMET, da Escola de Engenharia da UFMG, onde foram utilizados o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV – JEOL Modelo 6360LV) e o Espectrômetro de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS- Thermo NORAN Modelo QUEST) (FIG.40).



Figura 40 – Aparelho de Microscopia de Varredura Eletrônica
Fonte: Arquivo pessoal, 2007.

A seqüência de Figuras 41 a 45 apresenta, duas a duas, a microestrutura observa das duas argamassas, observação por MEV, em suas respectivas ampliações:

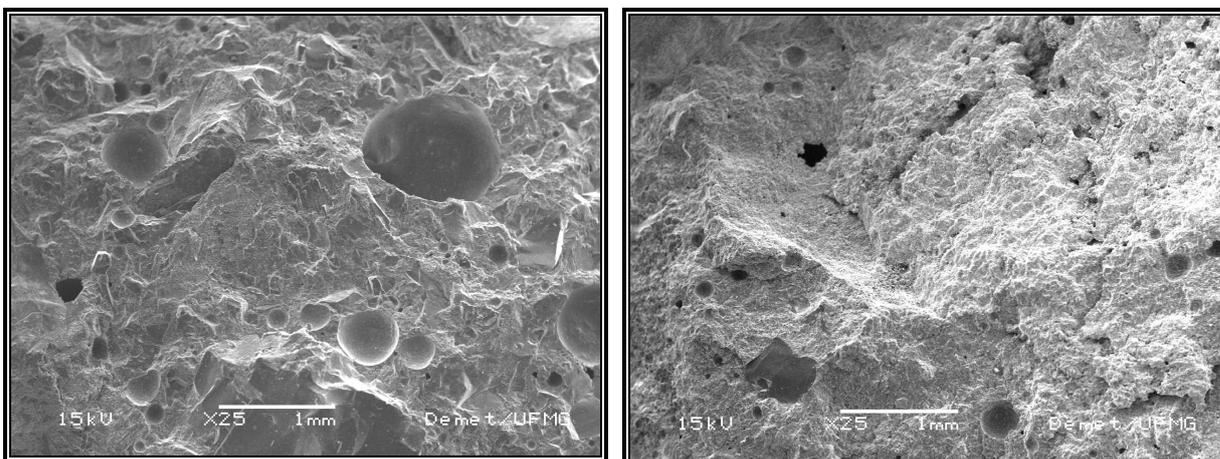


Figura 41 – Argamassa com areia comum e argamassa com rejeito de sinter feed: 25x
Fonte: Demet/UFMG, 2007.

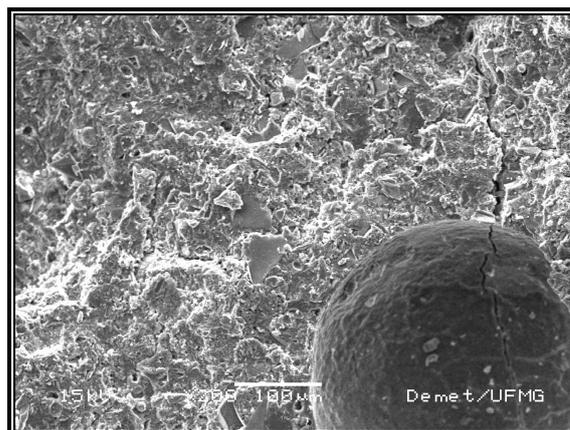
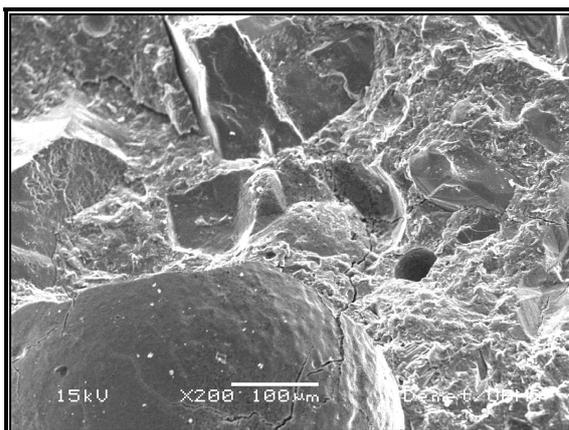


Figura 42 – Argamassa com areia comum e argamassa com rejeito de sinter feed: 200x
 Fonte: Demet/UFMG, 2007.

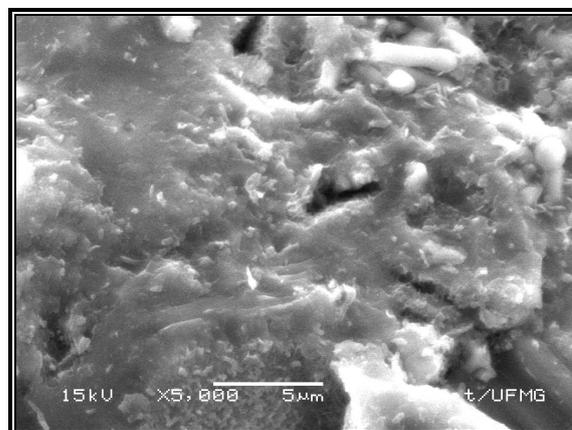
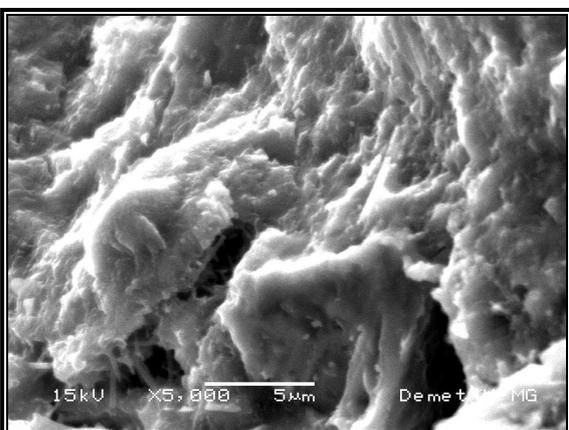


Figura 43 – Argamassa com areia comum e argamassa com rejeito de sinter feed: 5.000x
 Fonte: Demet/UFMG, 2007.

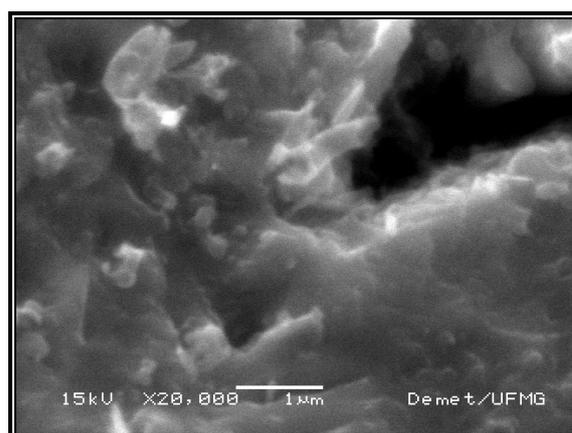
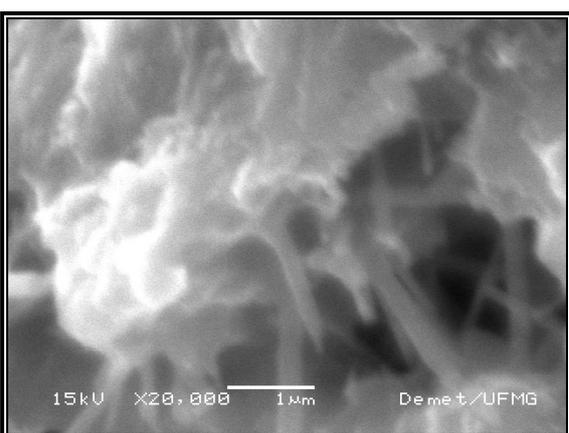


Figura 44 – Argamassa com areia comum e argamassa com rejeito de sinter feed: 20.000x
 Fonte: Demet/UFMG, 2007.

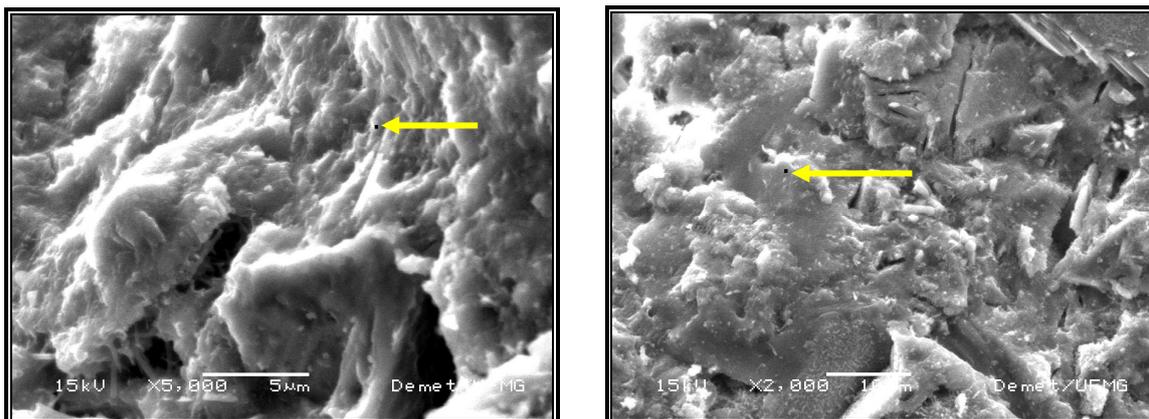


Figura 45 – Ponto do EDS – argamassa normal e Ponto do EDS – argamassa com rejeito
 Fonte: Demet/UFMG, 2007.

A Figura 45 apresenta detalhe da formação de cristais de etringita no interior de um poro do agregado e a Figura 46 permite visualizar uma zona de transição agregado/matriz na argamassa com rejeito.

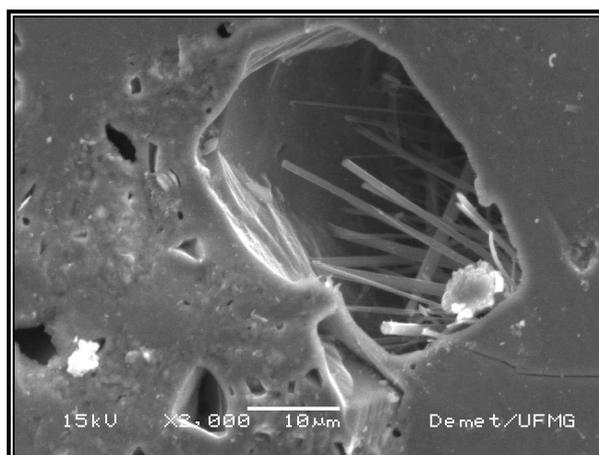


Figura 46 – Detalhe da formação de cristais de etringita no interior de um poro do agregado rejeito: 2.000x
 Fonte: Demet/UFMG, 2007.

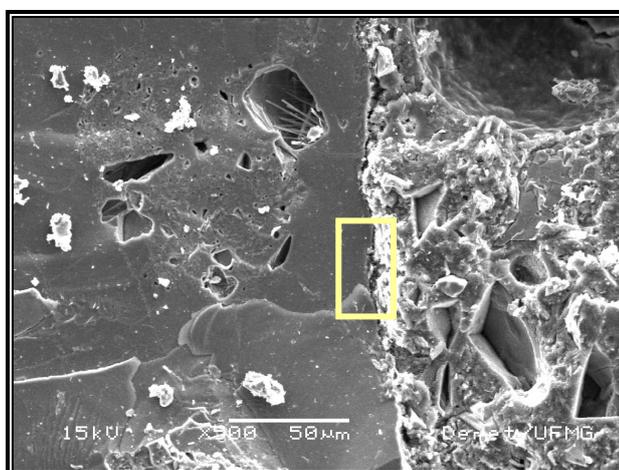


Figura 47 – Vista de uma zona de transição agregado/matriz na argamassa com rejeito: 500x
 Fonte: Demet/UFMG, 2007.

A Figura 48 amplia a imagem anterior.

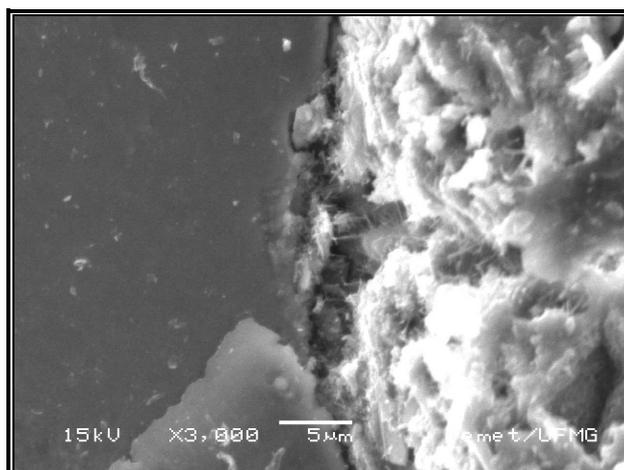


Figura 48 – Visão ampliada da área destacada da mesma zona de transição anterior: 3000x
 Fonte: Demet/UFMG, 2007.

As análises químicas qualitativas dos elementos presentes, realizadas através do EDS, estão apresentadas nas Tabelas 5 e 6, bem como nos Anexos a este trabalho).

Tabela 5

Análise química qualitativa semiquantitativa, através do EDS, no ponto destacado da Fig. 45 – imagem esquerda – argamassa com areia normal

Elemento	Peso (%)
O	33,14
Al	2,21
Si	18,49
S	1,27
K	0,21
Ca	43,93
Fe	0,74
	100,00

Fonte: Demet/UFMG, 2007.

Tabela 6

Análise química qualitativa e semiquantitativa através do EDS, no ponto destacado da Fig. 45 – imagem direita – argamassa com rejeito de sinter feed

Elemento	Peso (%)
O	11,38
Al	1,25
Si	13,57
S	1,22
K	1,25
Ca	68,60
Fe	2,73
	100,00

Fonte: Demet/UFMG, 2007.

As observações por meio do ensaio de MEV mostram aspectos bem característicos das duas amostras analisadas, típicas das argamassas de cimento e agregado

miúdo, sendo ainda possível constatar que a argamassa produzida com o rejeito de sinter feed apresenta uma matriz mais homogênea, fechada e mais farta. É natural que isto ocorra em função do efeito de nucleação propiciado pela maior fração de pulverulento apresentada pelo rejeito, que foi da ordem de **13%**, enquanto que a areia utilizada apresentou **0,6%**, pág. 116.

As análises químicas dos elementos presentes, determinadas através do ensaio EDS, são compatíveis com os resultados comumente obtidos em matrizes cimentícias. A ocorrência de goethita de 'pouco a muito porosa' identificada na microscopia ótica, sendo o mineral mais abundante no agregado, poderá apresentar vantagens adicionais no comportamento da zona de transição com a matriz cimentícia, propiciando uma ligação mais resistente pela interação física de agulhamento da pasta aos poros na superfície do agregado.

4.1.4 - Ensaio de caracterização ambiental

Os ensaios de caracterização ambiental foram executados no Laboratório de Resíduos Sólidos do CETEC, cujos resultados encontram-se a seguir (TAB. 7 a 15).

- **Solubilização para os parâmetros do Anexo G da NBR 10004**

Tabela 7
Resultado dos ensaios de solubilização das amostras A e B e respectivos limites

PARÂMETRO	A (mg/l)	B (mg/l)	LIMITE MÁX. (mg/l)
Prata	< 0,01	< 0,01	0,05
Alumínio	< 0,10	< 0,10	0,2
Bário	0,005	0,007	0,7
Cromo	< 0,04	< 0,04	0,05
Cobre	< 0,004	< 0,004	2,0
Ferro	< 0,03	0,08	0,3
Manganês	0,012	0,018	0,1
Sódio	0,45	0,93	200,0
Zinco	0,05	0,15	5,0
Mercúrio	<0,20 (µg/l)	<0,20 (µg/l)	0,001
Selênio	<0,0005	<0,0005	0,01
Arsênio	<0,0003	<0,0003	0,01
Chumbo	<0,005	<0,005	0,01
Cádmio	<0,0005	<0,0005	0,005

Fonte: CETEC, 2006.

- **Ensaio de Lixiviação para parâmetros inorgânicos, segundo o Anexo F da NBR 10004**

Tabela 8
Resultado dos ensaios de lixiviação das amostras C e respectivos limites

PARÂMETRO	C (mg/l)	LIMITE MÁX. (mg/l)
Prata	< 0,01	5,0
Bário	0,007	70,0
Cromo	< 0,04	5,0
Arsênio	<0,0003	1,0
Cádmio	<0,0005	0,5
Chumbo	<0,005	1,0
Mercúrio	<0,20 (µg/l)	0,1
Selênio	<0,0005	1,0

Fonte: CETEC, 2006.

Classificação do Resíduo Sólido segundo a NBR 10004

Nos ensaios de lixiviação e solubilização nenhum de seus extratos apresentou concentração de seus constituintes acima dos padrões estabelecidos pela Norma Brasileira, o que permitiu a classificação do rejeito como **Resíduo da Classe II B** – correspondente aos resíduos **inertes**.

4.1.5 - Ensaio de reatividade álcali-agregado

Tabela 9
Resultado do ensaio de reatividade álcali-agregado

Amostra	Sílica dissolvida – Sd (milimoles/litro)	Redução de alcalinidade – Ra (milimoles/litro)
01	7	446

Fonte: MINIMAX, 2006.

O ensaio visa verificar, pelo método químico, se o agregado enquadra-se na classificação de inócuo, deletério ou potencialmente deletério, através da marcação dos índices obtidos num gráfico previamente estabelecido. A Figura 49 mostra as respectivas marcações para locação do agregado em relação à curva padrão estabelecida pela respectiva norma.

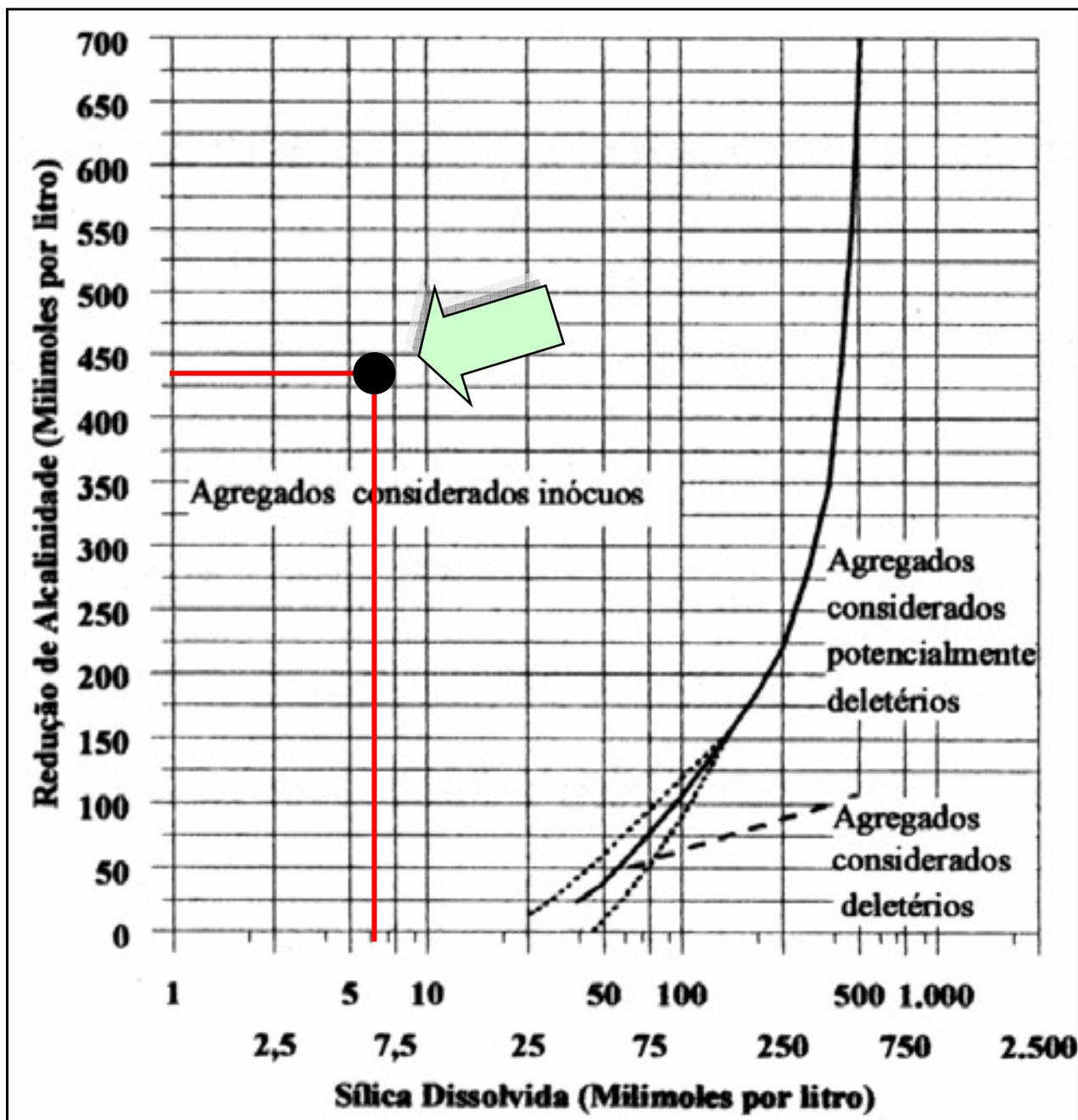


Figura 49 – Plotagem dos índices do ensaio de reatividade álcali-agregado no gráfico respectivo
 Fonte: NBR 9774 (ABNT); MINIMAX, 2006.

No ensaio de verificação da reatividade potencial do agregado, pelo método químico, álcali-agregado, o rejeito apresentou performance excelente, situando-se numa faixa muito favorável dos agregados considerados **inócuos**.

4.1.6 - Ensaio de durabilidade do agregado de resistência a sulfatos

Tabela 10
Ensaio de durabilidade - resistência a sulfatos

Amostra	Desgaste (%)
01	2,01

Fonte: SOLOCAP, 2006.

Trata-se de um ensaio químico acelerado, que visa medir o desgaste total do agregado através da perda de peso por faixas granulométricas, após determinados ciclos de lavagem em soluções sulfatadas; no caso, foi utilizado o sulfato de magnésio. A norma brasileira prevê um desgaste máximo de 12%.

No ensaio de durabilidade do agregado / resistência a sulfatos, o rejeito atendeu plenamente aos requisitos de Norma Brasileira, quando submetido ao sulfato de magnésio, que é mais agressivo, apresentando um **desgaste bem inferior** ao limite estabelecido.

4.1.7 - Determinação da massa específica

Tabela 11
Resultado da determinação da massa específica do rejeito

Amostra	Massa específica absoluta (kg/dm ³)
01	3,756

Fonte: DIEFRA, 2007.

Também chamada massa específica real, ou ainda densidade real, é um parâmetro importante através do qual classificamos os agregados em leves, densos ou normais e extradensos ou pesados. É um parâmetro que nos propicia também o cálculo teórico do consumo de cimento por m³ dos traços de concreto. Segundo Mehta e Monteiro (2006), os agregados pesados apresentam massa específica na faixa de 3,4 a 6,5 kg/dm³. Como se vê, trata-se o rejeito de um agregado que se enquadra na classificação de pesado e que, por conseguinte, conduzirá, como já referido, a peças de peso mais elevado.

A alta densidade do material está relacionada ao ainda elevado teor de Ferro presente no rejeito.

Para se avaliar a ordem de grandeza deste aumento de peso, foram comparadas as densidades das argamassas, a partir de corpos de prova adensados e endurecidos, produzidas com areia lavada média e com a produzida com o rejeito em questão. A média das primeiras foi de **2,112 g/cm³**, enquanto que a média das segundas foi de **2,780 g/cm³**, ou seja, a argamassa com rejeito mostrou-se **31,65%** mais pesada.

4.1.8 - Determinação da massa unitária

Tabela 12
Resultado da determinação da massa unitária do rejeito

Amostra	Massa unitária (Kg/dm³)
01	1,862

Fonte: DIEFRA, 2007.

Também chamada massa aparente ou densidade aparente, trata-se de parâmetro importante para o estabelecimento dos traços de concreto em volume, a partir de dosagens experimentais desenvolvidas.

4.1.9 - Ensaio de determinação do teor de argila em torrões

Tabela 13
Resultado da determinação do teor de argila em torrões do rejeito

Amostra	Torrões de argila (%)
01	0,0

Fonte: DIEFRA, 2007.

É uma verificação importante que visa quantificar eventuais contaminações do agregado com argila ou materiais friáveis, que durante o processamento do concreto podem destorroar-se em finos, comprometendo a dosagem de água, a trabalhabilidade e a resistência do concreto. A norma brasileira estabelece para este quesito um percentual máximo de 3%.

4.1.10 - Determinação do teor de materiais pulverulentos

Tabela 14
Resultado da determinação do teor de materiais pulverulentos do rejeito

Amostra	Material pulverulento (%)
01	13,7

Fonte: DIEFRA, 2007.

Semelhantemente aos torrões de argila, o material pulverulento, embora necessariamente não constitua contaminação, mas quando em excesso e dependendo das características desejadas na mescla granulométrica, pode constituir-se em teor de finos que, eventualmente, poderão comprometer a trabalhabilidade do concreto, bem como a sua resistência mecânica. A norma brasileira estabelece para este quesito um percentual máximo de 3% para os concretos sujeitos a desgaste superficial e 5% para concretos protegidos deste desgaste. Para agregados oriundos de processos industriais, tal como o rejeito em estudo, estes percentuais são elevados para 10% e 12%, respectivamente.

O rejeito em questão, já incorporando em sua granulometria um teor de material pulverulento da ordem de 14%, em nada compromete a sua utilização para a finalidade colimada. A grande maioria das dosagens de concreto, para a produção de peças com a finalidade central desta pesquisa, incorpora percentuais de pó de pedra (pó calcário) que atingem percentuais de até 25% em relação ao agregado total; parte significativa deste pó de pedra pode ser reduzido de forma vantajosa, já que o material pulverulento do rejeito o substitui em parte e atua como filler, promovendo o efeito da nucleação e crescimento.

4.1.11 - Determinação de impurezas orgânicas

Tabela 15
Resultado da determinação de impurezas orgânicas do rejeito

Amostra	Argila em torrões p.p.m.
01	≤ 300

Fonte: DIEFRA, 2007.

As impurezas orgânicas podem afetar as reações de hidratação do cimento e geração dos seus principais compostos, comprometendo a resistência do concreto.

A norma brasileira estabelece a condição máxima de 300 ppm e, no ensaio, quando este teor supera a coloração correspondente aos 300 ppm deve ser procedido ao ensaio de qualidade da areia.

4.1.12 - Ensaio de granulometria

No Quadro 22 a seguir estão apresentadas as granulometrias dos dois agregados considerados nesta etapa da pesquisa: a da amostra coletada do rejeito em estudo e a da areia natural tomada como referência para o ensaio de qualidade do agregado / comparativo de resistência.

Trata-se o rejeito de material com características de uma areia grossa, no limite superior da faixa ótima, tendo esta amostra o diâmetro máximo de **6,3mm** e módulo de finura de **3,09**.

A areia tomada como referência é média, situando-se quase que integralmente na faixa utilizável, com diâmetro máximo de **2,4mm** e módulo de finura de **2,42**.

Quadro 22 – Resultado dos ensaios de granulometria da areia e do rejeito

GRANULOMETRIA DA AREIA - NORMA ABNT NBR 7211					
INFORMAÇÕES GERAIS			ANÁLISE GRANULOMÉTRICA		
AGREGADO	01	02	Peneira	% Retida Acumulada	
MATERIAL:	Rejeito Lavado	Areia Lavada	(mm)	Amostra 01	Amostra 02
NATUREZA:	Ferro-quartzoso.	Quartzosa	9,50	0,0	0,0
PROCEDÊNCIA:	Sarzedo	Moeda	6,30	2,0	0,0
PROPRIETÁRIO:	Itaminas	Dragagem Brasil	4,75	7,0	0,0
UTILIZAÇÃO:	Argam./Concr.	Argam./Concr.	2,36	25,0	2,0
IMP. ORGÂNICA:	< =300 ppm	< = 300 ppm	1,18	47,0	8,0
ARG. EM TORRÕES:	0%	0%	0,60	68,0	42,0
MAT. PULVERULENTO:	13,7%	0,6%	0,30	77,0	91,0
COEF. DE VAZIOS:	50,40%	50,00%	0,15	83,0	99,0
MOD. DE FINURA	3,09	2,42	fundo	100	100
ESPECIFICAÇÃO	PERCENTAGENS RETIDAS ACUMULADAS				
	PENEIRAS	FAIXA ÓTIMA		FAIXA UTILIZÁVEL	
ABNT NBR 7211	(mm)	Inferior	Superior	Inferior	Superior
	9,5	0,0	0,0	0,0	0,0
	6,3	0,0	0,0	0,0	7,0
	4,75	0,0	5,0	0,0	10,0
	2,36	10,0	20,0	0,0	25,0
	1,18	20,0	30,0	5,0	50,0
	0,6	35,0	55,0	15,0	70,0
	0,3	65,0	85,0	50,0	95,0
	0,15	90,0	95,0	85,0	100,0
CURVAS GRANULOMÉTRICAS					
% RETIDAS ACUMULADAS					
<p>O gráfico apresenta o percentual de areia retida acumulada em função do tamanho da peneira (em mm) para duas amostras: Amostra 01 (rejeito lavado) e Amostra 02 (areia lavada). O eixo horizontal representa o tamanho da peneira em mm, variando de 0,0 a 100,0 em escala logarítmica. O eixo vertical representa o percentual de areia retida acumulada, variando de 0 a 100. Duas faixas de referência são mostradas: a Faixa Ótima (linha verde) e a Faixa Utilizável (linha amarela). A Amostra 01 (linha vermelha com pontos) apresenta uma curva que se mantém dentro da faixa ótima, enquanto a Amostra 02 (linha azul com pontos) apresenta uma curva que se mantém dentro da faixa utilizável.</p>					
Observações:					

Fonte: DIEFRA, 2007.

Nos ensaios de caracterização física dos agregados miúdos, estabelecidos pelas Normas Brasileiras, o rejeito **atendeu a todos os requisitos**, com exceção apenas ao teor de material pulverulento, o que, contudo, não comprometeu sua performance, conforme pode ser visto no ensaio comparativo de resistência à compressão axial.

No ensaio de granulometria, percebe-se ainda que o rejeito apresenta acentuada inflexão na curva das porcentagens retidas acumuladas, nas peneiras 0,3 e 0,15 mm, o que corresponde a uma acentuada redução das porcentagens retidas nestas peneiras. Eventualmente isto poderá requerer alguma correção de finos, através da mistura de uma areia fina, com o intuito de melhorar este aspecto da mescla granulométrica, quando da produção de concreto. Contudo, no caso de uma eventual necessidade desta mistura, o tecnologista deverá estar atento para a possibilidade de ocorrer segregação na moldagem das peças, em decorrência da diferença dos pesos específicos destes agregados, tomando as providências para evitar esta ocorrência.

4.1.13 - Ensaio de qualidade do agregado miúdo / comparativo de resistência

Para o ensaio de qualidade do agregado miúdo (comparativo de resistência), tomou-se como referência os resultados de resistência à compressão obtidos em argamassa utilizando uma areia, de procedência conhecida e reconhecida como de boa qualidade, de uso corrente em obras de concreto em nossa região, muito embora o rejeito tenha se mostrado isento de matéria orgânica. Este procedimento (utilizado como um aproveitamento e adaptação dos princípios da NBR 7221) teve por objetivo apenas ser o ensaio de fechamento da primeira etapa da pesquisa, agregando valores interessantes ao estudo e às respectivas conclusões sobre a qualidade do rejeito.

Devido à significativa diferença de densidade dos materiais comparados, para o ensaio de qualidade do agregado miúdo (comparativo de resistência) foi necessário um ajuste na pesagem dos mesmos de forma igualar os volumes de material nas argamassas produzidas.

Assim, as argamassas trabalhadas foram produzidas nos seguintes traços unitários em peso (cimento, agregado e água), o que correspondeu ao mesmo volume de agregados, igual a $1,772 \text{ dm}^3/\text{kg}$ de cimento:

- Argamassa com agregado de referência: **1 : 2,35 : 0,6**
- Argamassa com agregado estudado: **1 : 3,30 : 0,6**

O fator água/cimento adotado foi 0,6 e foi utilizado o cimento Portland LIZ-CPII-E-32.

Foram moldados 04 (quatro) corpos de prova de diâmetro 50mm x 100 mm para rompimento em cada idade de 3, 7, 14 e 28 dias. O Quadro 23 apresenta os resultados (médias de cada 2 resultados de rompimento) e o gráfico ilustrativo das resistências obtidas.

Quadro 23 – Resultado de ensaio comparativo de resistência à compressão em argamassas de areia e rejeito

		RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES							
INFORMAÇÕES GERAIS	AGREGADO	1		2		3		4	
	MATERIAL	Areia de referência		Rejeiro Sinter feed					
	NATUREZA	Quartzosa		Ferro-quartzoso					
	ORIGEM	Moeda		Sarzedo					
	PROPRIETÁRIO	Dragagem Brasil		Itaminas					
	MASSA ESPECÍF (Kg/dm3)	2,653		3,756					
	MASSA UNIT. (Kg/dm3)	1,326		1,862					
	DIÂMETRO MAX. (mm)	2,40		6,30					
	MÓDULO DE FINURA	2,42		3,09					
	UTILIZAÇÃO	Argam./Concreto		Argam./Concreto					
	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (MPa)								
Corpos-de-prova de 5,0 cm x 10,0 cm		RESULTADOS COMPARATIVOS DE RESISTÊNCIA							
		C/ AGREGADO 1		C/ AGREGADO 2		C/ AGREGADO 3		C/ AGREGADO 4	
		1º. Result.	2º. Result.	1º. Result.	2º. Result.	1º. Result.	2º. Result.	1º. Result.	2º. Result.
IDADE (dias)	3	11,70	11,70	13,70	13,03				
		11,70		13,37		0,00		0,00	
	7	14,60	15,70	19,76	19,63				
		15,15		19,70		0,00		0,00	
	14	18,70	18,80	24,33	24,16				
		18,75		24,25		0,00		0,00	
	28	24,15	24,50	29,10	28,66				
		24,33		28,88		0,00		0,00	
CURVAS DE RESISTÊNCIA DA ARGAMASSA POR TIPO DE AGREGADO UTILIZADO									
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (MPa)									
<p>Gráfico de linhas mostrando a resistência à compressão simples (RCS) em MPa versus a idade em dias para dois tipos de agregados: Agregado 1 (azul) e Agregado 2 (vermelho). O eixo Y varia de 0,0 a 45,0 MPa e o eixo X varia de 0 a 30 dias. Os dados são os seguintes: Agregado 1: 3 dias (11,7), 7 dias (15,2), 14 dias (18,8), 28 dias (24,3); Agregado 2: 3 dias (13,4), 7 dias (19,7), 14 dias (24,2), 28 dias (28,9).</p>									
OBSERVAÇÕES:									

Fonte: DIEFRA, 2007.

No ensaio de qualidade da areia/comparativo de resistência à compressão, a argamassa traçada com o rejeito apresentou, em todas as idades do ensaio, **resistências maiores** que as da argamassa traçada com a areia tomada como de referência, o que demonstra a boa qualidade do rejeito como agregado miúdo para a argamassa.

4.2 – Segunda etapa – produção dos bloquetes

Nos Quadros 24 a 32 são apresentados os resultados dos ensaios executados com as amostras do Paver 8, produzidas com o rejeito e conforme estabelecido nos itens 3.2 e 3.4 do Programa Experimental da presente pesquisa.

Quadro 24 – Resultados de ensaio das amostras do Traço 1 – Resistência à compressão

		RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - NBR 9781							
INFORMAÇÕES GERAIS	PEÇA	PAVER 8							
	MATERIAL	Traço 1 : 75% rejeito + 25% areia							
	INDÚSTRIA		IBEC						
	FINALIDADE		Teste						
	INTERESSADO		Ayrton						
	PESO MÉDIO (Kg)		3,845						
	DIMENSÃO NOMINAL (mm)		200 x 100 x 80						
	DIMENSÃO MÉDIA (mm)		198 x 98 x 78						
	DATA FABRICAÇÃO		29/8/2008						
	UTILIZAÇÃO		Pavimento Intertr.						
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (MPa)									
Corpos de prova de Paver 8		RESULTADOS DE RESISTÊNCIA						Resist. Caract.	
		Valores individuais / Valor médio							
		1º. Result.	2º. Result.	3º. Result.	4º. Result.	5º. Result.	6º. Result.		
IDADE (em dias)	0	0,00						0,00	
	7	23,97	22,45	31,28	31,69	28,56	24,93	23,54	
	14	35,29	37,78	38,27	31,12	29,71	28,48	29,55	
	28	36,25	34,20	33,80	34,50	35,61	34,80	34,02	
		34,86						34,02	
CURVAS DE RESISTÊNCIA									
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)									
OBSERVAÇÕES:									

Quadro 25 – Resultados de ensaio das amostras do Traço 2 – Resistência à compressão

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - NBR 9781								
INFORMAÇÕES GERAIS	PEÇA	PAVER 8						
	MATERIAL	Traço 2 : 50% rejeito + 50% areia						
	INDÚSTRIA			IBEC				
	FINALIDADE			Teste				
	INTERESSADO			Ayrton				
	PESO MÉDIO (Kg)			3,585				
	DIMENSÃO NOMINAL (mm)			200 x 100 x 80				
	DIMENSÃO MÉDIA (mm)			198 x 98 x 78				
	DATA FABRICAÇÃO			29/8/2008				
	UTILIZAÇÃO			Pavimento Intertr.				
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (MPa)								
Corpos de prova de Paver 8		RESULTADOS DE RESISTÊNCIA						
		Valores individuais / Valor médio						Resist. Caract.
		1º. Result.	2º. Result.	3º. Result.	4º. Result.	5º. Result.	6º. Result.	
IDADE (em dias)	0	0,00						0,00
		19,63	21,49	24,44	20,89	22,70	18,06	19,13
	7	21,20						19,13
		25,31	22,92	27,02	26,09	29,09	27,98	24,40
	14	26,40						24,40
		34,83	33,23	38,48	37,14	30,73	37,49	32,60
	28	35,32						32,60
CURVAS DE RESISTÊNCIA								
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)								
OBSERVAÇÕES:								

Quadro 26 – Resultados de ensaio das amostras do Traço 3 – Resistência à compressão

		RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - NBR 9781							
INFORMAÇÕES GERAIS	PEÇA	PAVER 8							
	MATERIAL	Traço 3 : 50% rejeito + 25% areia + 25% pó							
	INDÚSTRIA		IBEC						
	FINALIDADE		Teste						
	INTERESSADO		Ayrton						
	PESO MÉDIO (Kg)		3,575						
	DIMENSÃO NOMINAL (mm)		200 x 100 x 80						
	DIMENSÃO MÉDIA (mm)		198 x 98 x 78						
	DATA FABRICAÇÃO		9/7/2008						
	UTILIZAÇÃO		Pavimento Intertr.						
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (MPa)									
Corpos de prova de Paver 8		RESULTADOS DE RESISTÊNCIA						Resist. Caract.	
		Valores individuais / Valor médio							
		1°. Result.	2°. Result.	3°. Result.	4°. Result.	5°. Result.	6°. Result.		
IDADE (em dias)	0							0,00	
	7	18,34	15,78	16,43	19,74	18,01	19,48	17,96	
								16,50	
	14	24,56	31,23	26,64	28,91	28,56	27,91	27,97	
								25,90	
28	30,23	31,19	33,64	34,20	33,17	32,33	32,46		
							31,06		
CURVAS DE RESISTÊNCIA									
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)									
<p>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)</p> <p>RCS - Resist. compressão (MPa)</p> <p>Idade (dias)</p> <p>RESIST. MÉDIA.</p> <p>RESIST. CARACT.</p>									
OBSERVAÇÕES:									

Quadro 27 – Resultados de ensaio das amostras do Traço 1 – Absorção de água

ABSORÇÃO DE ÁGUA - NBR 12.118														
INFORMAÇÕES GERAIS	PEÇA	PAVER 8												
	MATERIAL	Traço 1 : 75 % rejeito + 25 % areia												
	INDÚSTRIA		Ibec											
	FINALIDADE		Teste											
	INTERESSADO		Ayrton											
	PESO MÉDIO (Kg)		3,845											
	DIMENSÃO NOMINAL (mm)		200 x 100 x 80											
	DIMENSÃO MÉDIA (mm)		198 x 98 x 78											
	DATA FABRICAÇÃO		29/8/2008											
	UTILIZAÇÃO		Pavimento Intertr.											
ABSORÇÃO DE ÁGUA														
Corpos de Prova de Paver 8		RESULTADOS DE ABSORÇÃO (%)			Absorção Média									
		Medidas dos Pesos (Kg)												
		Peso Seco ao Ar	Peso seco em estufa	Peso Sat. Sup. Seca										
CORPO DE PROVA	CP 1	3,76	3,61	3,86	6,46									
		6,87												
	CP 2	3,77	3,59	3,79										
		5,46												
	CP 3	3,57	3,41	3,65										
		7,04												
<p style="text-align: center;">Absorção de Água</p> <table border="1"> <caption>Data for Absorção de Água Chart</caption> <thead> <tr> <th>Corpo de Prova</th> <th>Absorção (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CP 1</td> <td>6,87</td> </tr> <tr> <td>CP 2</td> <td>5,46</td> </tr> <tr> <td>CP 3</td> <td>7,04</td> </tr> <tr> <td>Média</td> <td>6,46</td> </tr> </tbody> </table>					Corpo de Prova	Absorção (%)	CP 1	6,87	CP 2	5,46	CP 3	7,04	Média	6,46
Corpo de Prova	Absorção (%)													
CP 1	6,87													
CP 2	5,46													
CP 3	7,04													
Média	6,46													
OBSERVAÇÕES:														
Corpos de prova com idades de 28/30 dias														
Peso seco em estufa: após 24 horas de secagem														

Quadro 28 – Resultados de ensaio das amostras do Traço 2 – Absorção de água

ABSORÇÃO DE ÁGUA - NBR 12.118															
INFORMAÇÕES GERAIS	PEÇA	PAVER 8													
	MATERIAL	Traço 2 : 50 % rejeito + 50 % areia													
	INDÚSTRIA		Ibec												
	FINALIDADE		Teste												
	INTERESSADO		Ayrton												
	PESO MÉDIO (Kg)		3,585												
	DIMENSÃO NOMINAL (mm)		200 x 100 x 80												
	DIMENSÃO MÉDIA (mm)		198 x 98 x 78												
	DATA FABRICAÇÃO		29/8/2008												
	UTILIZAÇÃO		Pavimento Intertr.												
ABSORÇÃO DE ÁGUA															
Corpos de Prova de Paver 8		RESULTADOS DE ABSORÇÃO (%)				Absorção Média									
		Medidas dos Pesos (Kg)			7,12										
		Peso Seco ao Ar	Peso seco em estufa	Peso Sat. Sup. Seca											
CORPO DE PROVA	CP 1	3,41	3,26	3,50	7,12										
		7,29													
	CP 2	3,74	3,57	3,80											
		6,68													
	CP 3	3,46	3,30	3,55											
		7,39													
<p style="text-align: center;">Absorção de Água</p> <table border="1"> <caption>Data for Absorção de Água Chart</caption> <thead> <tr> <th>Corpo de Prova</th> <th>Absorção (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CP 1</td> <td>7,29</td> </tr> <tr> <td>CP 2</td> <td>6,68</td> </tr> <tr> <td>CP 3</td> <td>7,39</td> </tr> <tr> <td>Média</td> <td>7,12</td> </tr> </tbody> </table>						Corpo de Prova	Absorção (%)	CP 1	7,29	CP 2	6,68	CP 3	7,39	Média	7,12
Corpo de Prova	Absorção (%)														
CP 1	7,29														
CP 2	6,68														
CP 3	7,39														
Média	7,12														
OBSERVAÇÕES:															
Corpos de prova com idades de 28/30 dias															
Peso seco em estufa: após 24 horas de secagem															

Quadro 29 – Resultados de ensaio das amostras do Traço 3 – Absorção de água

ABSORÇÃO DE ÁGUA - NBR 12.118														
INFORMAÇÕES GERAIS	PEÇA	PAVER 8												
	MATERIAL	Traço 3 : 50 % rejeito + 25 % areia + 25% pó												
	INDÚSTRIA		IBEC											
	FINALIDADE		Teste											
	INTERESSADO		Ayrton											
	PESO MÉDIO (Kg)		3,575											
	DIMENSÃO NOMINAL (mm)		200 x 100 x 80											
	DIMENSÃO MÉDIA (mm)		198 x 98 x 78											
	DATA FABRICAÇÃO		9/7/2008											
	UTILIZAÇÃO		Pavimento Intertr.											
ABSORÇÃO DE ÁGUA														
Corpos de Prova de Paver 8		RESULTADOS DE ABSORÇÃO (%)			Absorção Média									
		Medidas dos Pesos (Kg)												
		Peso Seco ao Ar	Peso seco em estufa	Peso Sat. Sup. Seca										
CORPO DE PROVA	CP 1	3,43	3,22	3,39	5,90									
		5,28												
	CP 2	3,51	3,33	3,54										
		6,31												
	CP 3	3,46	3,27	3,47										
		6,12												
<p style="text-align: center;">Absorção de Água</p> <table border="1"> <caption>Data for Absorção de Água Chart</caption> <thead> <tr> <th>Corpo de Prova</th> <th>Absorção (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CP 1</td> <td>5,28</td> </tr> <tr> <td>CP 2</td> <td>6,31</td> </tr> <tr> <td>CP 3</td> <td>6,12</td> </tr> <tr> <td>Média</td> <td>5,90</td> </tr> </tbody> </table>					Corpo de Prova	Absorção (%)	CP 1	5,28	CP 2	6,31	CP 3	6,12	Média	5,90
Corpo de Prova	Absorção (%)													
CP 1	5,28													
CP 2	6,31													
CP 3	6,12													
Média	5,90													
OBSERVAÇÕES:														
Corpos de prova com idades de 28/30 dias														
Peso seco em estufa: após 24 horas de secagem														

Quadro 30 – Resultados de ensaio das amostras do Traço 1 – Ensaio de abrasão

ENSAIO DE ABRASÃO - NBR 12.042																															
INFORMAÇÕES GERAIS	PEÇA	PAVER 8																													
	MATERIAL	Traço 1 : 75%rejeito + 25%areia																													
	INDÚSTRIA	Ibec																													
	FINALIDADE	Teste																													
	INTERESSADO	Ayrton																													
	PESO MÉDIO (Kg)	3,845																													
	DIMENSÃO NOMINAL (mm)	200 x 100 x 80																													
	DIMENSÃO MÉDIA (mm)	198 x 98 x 78																													
	DATA FABRICAÇÃO	29/8/2008																													
	UTILIZAÇÃO	Pavimento Intertr.																													
ENSAIO DE DESGASTE POR ABRASÃO																															
Corpos de Prova extraídos do Paver 8		RESULTADOS DAS PERDAS DE MASSA (%)																													
		250 voltas = 500m			500 voltas = 1000m			500 voltas Perda média																							
	Massa inic.	Massa final	Dif. Parcial	Massa inic.	Massa final	Dif. Total																									
CORPO DE PROVA	CP 1a	916,28	903,68	12,60	916,28	898,44	17,84	1,98																							
		1,38			1,95																										
	CP 1b	839,90	833,26	6,64	839,90	822,96	16,94																								
		0,79			2,02																										
	CP 2a	905,10	892,13	12,97	905,10	888,20	16,90																								
		1,43			1,87																										
	CP 2b	815,30	807,11	8,19	815,30	798,11	17,19																								
		1,00			2,11																										
<p style="text-align: center;">DESGASTE POR ABRASÃO</p> <table border="1"> <caption>Dados do Gráfico de Desgaste por Abrasão</caption> <thead> <tr> <th>Corpo de Prova</th> <th>500 m (%)</th> <th>1000 m (%)</th> <th>Total (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CP 1a</td> <td>1,38</td> <td>0,55</td> <td>1,93</td> </tr> <tr> <td>CP 1b</td> <td>0,79</td> <td>1,23</td> <td>2,02</td> </tr> <tr> <td>CP 2a</td> <td>1,43</td> <td>0,44</td> <td>1,87</td> </tr> <tr> <td>CP 2b</td> <td>1,00</td> <td>1,11</td> <td>2,11</td> </tr> <tr> <td>Média</td> <td>1,98</td> <td>0,00</td> <td>1,98</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">CORPOS DE PROVA</p>								Corpo de Prova	500 m (%)	1000 m (%)	Total (%)	CP 1a	1,38	0,55	1,93	CP 1b	0,79	1,23	2,02	CP 2a	1,43	0,44	1,87	CP 2b	1,00	1,11	2,11	Média	1,98	0,00	1,98
Corpo de Prova	500 m (%)	1000 m (%)	Total (%)																												
CP 1a	1,38	0,55	1,93																												
CP 1b	0,79	1,23	2,02																												
CP 2a	1,43	0,44	1,87																												
CP 2b	1,00	1,11	2,11																												
Média	1,98	0,00	1,98																												
OBSERVAÇÕES:																															
Corpos de prova extraídos de bloquetes com idade de 28/30 dias																															
Massas expressas em g.																															

Quadro 31 – Resultados de ensaio das amostras do Traço 2 – Ensaio de abrasão

ENSAIO DE ABRASÃO - NBR 12.042																															
INFORMAÇÕES GERAIS	PEÇA	PAVER 8																													
	MATERIAL	Traço 2 : 50% rejeito + 50 % areia																													
	INDÚSTRIA		Ibec																												
	FINALIDADE		Teste																												
	INTERESSADO		Ayrton																												
	PESO MÉDIO (Kg)		3,585																												
	DIMENSÃO NOMINAL (mm)		200 x 100 x 80																												
	DIMENSÃO MÉDIA (mm)		198 x 98 x 78																												
	DATA FABRICAÇÃO		29/8/2008																												
	UTILIZAÇÃO		Pavimento Intertr.																												
ENSAIO DE DESGASTE POR ABRASÃO																															
Corpos de Prova extraídos do Paver 8		RESULTADOS DAS PERDAS DE MASSA (%)																													
		250 voltas = 500m			500 voltas = 1000m			500 voltas																							
		Massa inic.	Massa final	Dif. Parcial	Massa inic.	Massa final	Dif. Total																								
CORPO DE PROVA	CP 1a	757,46	749,40	8,06	757,46	745,40	12,06																								
		1,06			1,59			1,26																							
	CP 1b	846,12	842,80	3,32	846,12	838,40	7,72																								
		0,39			0,91																										
	CP 2a	862,13	858,70	3,43	862,13	851,23	10,90																								
		0,40			1,26																										
	CP 2b	961,25	955,03	6,22	961,25	949,20	12,05																								
		0,65			1,25																										
<p style="text-align: center;">DESGASTE POR ABRASÃO</p> <table border="1"> <caption>Dados do Gráfico de Desgaste por Abrasão</caption> <thead> <tr> <th>Corpo de Prova</th> <th>500 m (%)</th> <th>1000 m (%)</th> <th>Total (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CP 1a</td> <td>1,06</td> <td>0,54</td> <td>1,60</td> </tr> <tr> <td>CP 1b</td> <td>0,39</td> <td>0,53</td> <td>0,92</td> </tr> <tr> <td>CP 2a</td> <td>0,40</td> <td>0,86</td> <td>1,26</td> </tr> <tr> <td>CP 2b</td> <td>0,65</td> <td>0,57</td> <td>1,22</td> </tr> <tr> <td>Média</td> <td>0,65</td> <td>0,61</td> <td>1,26</td> </tr> </tbody> </table>									Corpo de Prova	500 m (%)	1000 m (%)	Total (%)	CP 1a	1,06	0,54	1,60	CP 1b	0,39	0,53	0,92	CP 2a	0,40	0,86	1,26	CP 2b	0,65	0,57	1,22	Média	0,65	0,61
Corpo de Prova	500 m (%)	1000 m (%)	Total (%)																												
CP 1a	1,06	0,54	1,60																												
CP 1b	0,39	0,53	0,92																												
CP 2a	0,40	0,86	1,26																												
CP 2b	0,65	0,57	1,22																												
Média	0,65	0,61	1,26																												
OBSERVAÇÕES:																															
Corpos de prova extraídos de bloquetes com idade de 28/30 dias																															
Massas expressas em g.																															

Quadro 32 – Resultados de ensaio das amostras do Traço 3 – Ensaio de abrasão

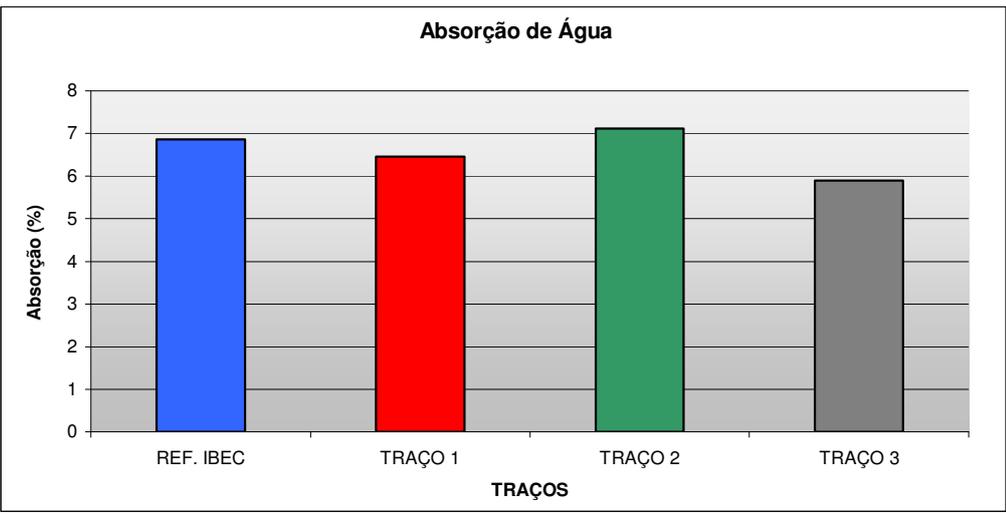
ENSAIO DE ABRASÃO - NBR 12.042																															
INFORMAÇÕES GERAIS	PEÇA	PAVER 8																													
	MATERIAL	Traço 3 : 50% rejeito + 25 % areia + 25% pó																													
	INDÚSTRIA				IBEC																										
	FINALIDADE				Teste																										
	INTERESSADO				Ayrton																										
	PESO MÉDIO (Kg)				3,575																										
	DIMENSÃO NOMINAL (mm)				200 x 100 x 80																										
	DIMENSÃO MÉDIA (mm)				198 x 98 x 78																										
	DATA FABRICAÇÃO				9/7/2008																										
	UTILIZAÇÃO				Pavimento Intertr.																										
ENSAIO DE DESGASTE POR ABRASÃO																															
Corpos de Prova extraídos do Paver 8		RESULTADOS DAS PERDAS DE MASSA (%)																													
		250 voltas = 500m			500 voltas = 1000m			500 voltas Perda média																							
		Massa inic.	Massa final	Dif. Parcial	Massa inic.	Massa final	Dif. Total																								
CORPO DE PROVA	CP 1a	837,17	825,03	12,14	837,17	815,00	22,17																								
		1,45			2,65																										
	CP 1b	774,75	766,35	8,40	774,75	753,77	20,98																								
		1,08			2,71																										
	CP 2a	811,45	803,33	8,12	811,45	796,81	14,64																								
		1,00			1,80																										
	CP 2b	744,30	735,96	8,34	744,30	725,45	18,85																								
		1,12			2,53																										
							2,42																								
DESGASTE POR ABRASÃO																															
<p>PERDAS DE MASSA (%)</p> <p>CORPOS DE PROVA</p> <p>Legend: 1000 m (Azul), 500 m (Verde)</p> <table border="1"> <caption>Dados do Gráfico de Desgaste por Abrasão</caption> <thead> <tr> <th>Corpo de Prova</th> <th>500 m (%)</th> <th>1000 m (%)</th> <th>Total (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CP 1a</td> <td>1,45</td> <td>1,17</td> <td>2,62</td> </tr> <tr> <td>CP 1b</td> <td>1,08</td> <td>1,63</td> <td>2,71</td> </tr> <tr> <td>CP 2a</td> <td>1,00</td> <td>0,82</td> <td>1,82</td> </tr> <tr> <td>CP 2b</td> <td>1,12</td> <td>1,41</td> <td>2,53</td> </tr> <tr> <td>Média</td> <td>2,42</td> <td>0</td> <td>2,42</td> </tr> </tbody> </table>								Corpo de Prova	500 m (%)	1000 m (%)	Total (%)	CP 1a	1,45	1,17	2,62	CP 1b	1,08	1,63	2,71	CP 2a	1,00	0,82	1,82	CP 2b	1,12	1,41	2,53	Média	2,42	0	2,42
Corpo de Prova	500 m (%)	1000 m (%)	Total (%)																												
CP 1a	1,45	1,17	2,62																												
CP 1b	1,08	1,63	2,71																												
CP 2a	1,00	0,82	1,82																												
CP 2b	1,12	1,41	2,53																												
Média	2,42	0	2,42																												
OBSERVAÇÕES:																															
Corpos de prova extraídos de bloquetes com idade de 28/30 dias																															
Massas expressas em g.																															

Nos Quadros 33 a 35 são apresentados os valores dos resultados dos ensaios anteriormente registrados, por traço estudado, comparados com os valores de referência dos bloquetes da indústria IBEC, produzidos com o concreto convencional.

Quadro 33 – Resumo dos resultados dos traços da pesquisa com o traço de referência – Resistência à compressão

		COMPARATIVO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO							
INFORMAÇÕES GERAIS	MATERIAL	PAVER 8	PAVER 8	PAVER 8	PAVER 8				
	IDENTIFICAÇÃO	Refer. IBEC	Traço 1	Traço 2	Traço 3				
	NATUREZA	Pesquisa	Pesquisa	Pesquisa	Pesquisa				
	ORIGEM	Ibec	Ibec	Ibec	Ibec				
	PROPRIETÁRIO	Ayrton	Ayrton	Ayrton	Ayrton				
	PESO MÉDIO	3,366	3,845	3,585	3,575				
	DIMENSÃO NOMINAL (mm)	200 x 100 x 80	200 x 100 x 80	200 x 100 x 80	200 x 100 x 80				
	DIMENSÃO MÉDIA (mm)	198 x 98 x 78	198 x 98 x 78	198 x 98 x 78	198 x 98 x 78				
	DATA FABRICAÇÃO	23/5/2008	29/8/2008	29/8/2008	9/7/2008				
	UTILIZAÇÃO	Pavimentação	Pavimentação	Pavimentação	Pavimentação				
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (MPa)									
Identificação dos Traços		RESULTADOS COMPARATIVOS DA RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA							
		REFER. IBEC		TRAÇO 1		TRAÇO 2		TRAÇO 3	
		1º. Result.	2º. Result.	1º. Result.	2º. Result.	1º. Result.	2º. Result.	1º. Result.	2º. Result.
IDADES EM DIAS	0	0,00		0,00		0,00		0,00	
	7	20,22		23,54		19,13		16,50	
	14	32,21		29,55		24,40		25,90	
	28	34,92		34,02		32,60		31,06	
CURVAS DE RESISTÊNCIA DA ARGAMASSA POR TRAÇO UTILIZADO									
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (MPa)									
OBSERVAÇÕES:									

Quadro 34 – Resumo dos resultados dos traços da pesquisa com o traço de referência – Absorção de água

COMPARATIVO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA					
INFORMAÇÕES GERAIS	PEÇA	PAVER 8	PAVER 8	PAVER 8	PAVER 8
	MATERIAL	Refer. IBEC	Traço 1	Traço 2	Traço 3
	INDÚSTRIA	Ibec	Ibec	Ibec	Ibec
	FINALIDADE	Pesquisa	Pesquisa	Pesquisa	Pesquisa
	INTERESSADO	Ayrton	Ayrton	Ayrton	Ayrton
	PESO MÉDIO (Kg)	3,366	3,845	3,585	3,575
	DIMENSÃO NOMINAL (mm)	200 x 100 x 80	200 x 100 x 80	200 x 100 x 80	200 x 100 x 80
	DIMENSÃO MÉDIA (mm)	198 x 98 x 78	198 x 98 x 78	198 x 98 x 78	198 x 98 x 78
	DATA FABRICAÇÃO	23/5/2008	29/8/2008	29/8/2008	9/7/2008
	UTILIZAÇÃO	Pavimento Intertr.	Pavimento Intertr.	Pavimento Intertr.	Pavimento Intertr.
ABSORÇÃO DE ÁGUA					
Identificação dos traços		RESULTADOS DE ABSORÇÃO (%)			
		Absorção Média das Amostras por traço			
TRAÇOS	REF. IBEC	6,86			
	TRAÇO 1	6,46			
	TRAÇO 2	7,12			
	TRAÇO 3	5,90			
 <p style="text-align: center;">Absorção de Água</p>					
OBSERVAÇÕES:					
Corpos de prova com idades de 28/30 dias					
Peso seco em estufa: após 24 horas de secagem					

Quadro 35 – Resumo dos resultados dos traços da pesquisa com o traço de referência – Desgaste por abrasão

COMPARATIVO DE DESGASTE POR ABRASÃO														
INFORMAÇÕES GERAIS	PEÇA	PAVER 8	PAVER 8	PAVER 8	PAVER 8									
	MATERIAL	Refer. IBEC	Traço 1	Traço 2	Traço 3									
	INDÚSTRIA	Ibec	Ibec	Ibec	IBEC									
	FINALIDADE	Pesquisa	Pesquisa	Pesquisa	Pesquisa									
	INTERESSADO	Ayrton	Ayrton	Ayrton	Ayrton									
	PESO MÉDIO (Kg)	3,366	3,845	3,585	3,575									
	DIMENSÃO NOMINAL (mm)	200 x 100 x 80												
	DIMENSÃO MÉDIA (mm)	198 x 98 x 78												
	DATA FABRICAÇÃO	23/5/2008	29/8/2008	29/8/2008	9/7/2008									
	UTILIZAÇÃO	Pavimento Intertr.	Pavimento Intertr.	Pavimento Intertr.	Pavimento Intertr.									
COMPARATIVO DE DESGASTE POR ABRASÃO														
Identificação dos Traços	RESULTADOS DAS PERDAS DE MASSA (%)													
	250 voltas = 500m		500 voltas = 1000m											
	Desgaste Médio das Amostras por traço													
TRAÇOS	Ref. IBEC	3,19	6,45											
	Traço 1	1,15	1,98											
	Traço 2	0,62	1,26											
	Traço 3	1,16	2,42											
<p style="text-align: center;">DESGASTE POR ABRASÃO</p> <table border="1"> <caption>Data for Desgaste por Abrasão Chart</caption> <thead> <tr> <th>Traço</th> <th>Perda de Massa (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>REF. IBEC</td> <td>6,45</td> </tr> <tr> <td>TRAÇO 1</td> <td>1,98</td> </tr> <tr> <td>TRAÇO 2</td> <td>1,26</td> </tr> <tr> <td>TRAÇO 3</td> <td>2,42</td> </tr> </tbody> </table>					Traço	Perda de Massa (%)	REF. IBEC	6,45	TRAÇO 1	1,98	TRAÇO 2	1,26	TRAÇO 3	2,42
Traço	Perda de Massa (%)													
REF. IBEC	6,45													
TRAÇO 1	1,98													
TRAÇO 2	1,26													
TRAÇO 3	2,42													
OBSERVAÇÕES:														
Corpos de prova extraídos de bloquetes com idade de 28/30 dias														
Massas expressas em gr.														

Dos quadros comparativos anteriores, podemos concluir:

- As resistências características à compressão das amostras produzidas com o rejeito de Sinter Feed, em traços apenas com ajuste de mescla, apresentaram, aos 28 dias de idade, resistências muito próximas às obtidas na produção de referência da indústria, porém inferiores. A curva das resistências do Traço 1, contendo maior percentual de rejeito (75%), foi a que mais se aproximou da curva de referência, tendo apresentado nesta idade um desvio inferior de apenas 2,5%. O maior teor de rejeito, por suas características físico-mineralógicas, explicam satisfatoriamente esta performance melhor. As curvas do Traço 2 e do Traço 3 se mostraram mais distantes e com desvios inferiores, respectivamente de 6,6% e 11,0%. A magnitude dessas diferenças não comprometeu os objetivos da pesquisa. A Norma Brasileira NBR 9781 (1987) estabelece como condições exigíveis para a aceitação de peças pré-moldadas de concreto, destinadas à pavimentação de vias, uma resistência característica mínima de 35 MPa para veículos comerciais de linha. Sabe-se, contudo, que a grande maioria dos fabricantes, correntemente, não atendem com precisão este condicionante, para esta faixa de utilização de bloquetes. Há que se considerar também que não foram desenvolvidos estudos e ajustes tecnológicos de dosagem concreto, tendo em vista as limitações da pesquisa, especialmente no que tange ao proporcionamento do cimento e agregados. Estudos e práticas com este objetivo, certamente, eliminarão tais diferenças.
- As absorções médias de água dos traços produzidos com o rejeito de Sinter Feed, nas mesmas condições anteriores, apresentaram, aos 28 dias de idade, índices de absorção também muito próximos ao da produção de referência. A coluna referente a absorção do Traço 3 foi a que apresentou melhor resultado, refletindo uma absorção inferior à da referência em 14%. O menor percentual de rejeito (50%), juntamente com os percentuais de areia e pó de pedra presentes no traço (25% e 25%, respectivamente) certamente estabeleceram uma granulometria mais contínua, com menor índice de vazios, conduzindo, conseqüentemente, a uma menor absorção. As colunas do Traço 1 e Traço 2 mostraram absorções 5,8% inferior e 3,8% superior,

respectivamente. A diferença à maior apresentada pelo Traço 2 (3,8%) também não estabelece qualquer espécie quanto à viabilidade do emprego deste rejeito, já que, também neste quesito, em nada compromete os objetivos da pesquisa.

- Os desgastes a abrasão dos traços produzidos com o rejeito de Sinter Feed, nas mesmas condições anteriores, apresentaram, aos 28 dias de idade, índices de perda de massa sensivelmente menores que o apresentado pela amostra de referência, tanto no estágio de 250 voltas como no estágio final de 500 voltas. A coluna referente ao desgaste apresentado pelo Traço 2 (50% de rejeito e 50% de areia) é a que demonstra o melhor desempenho total, refletindo um percentual de desgaste 80% inferior ao apresentado pelo traço de referência. As colunas relativas ao Traço 1 e Traço 3 apresentaram percentuais inferiores de desgastes totais de 69% e 62%, respectivamente, em relação ao traço de referência. Estas performances, muitíssimo superiores à da amostra de referência, já era de se esperar em virtude do teor de Fe ainda contido no rejeito e constitui o aspecto mais relevante a ser almejado na produção destas peças.

5 – CONCLUSÕES

Do ponto de vista exclusivo da viabilidade técnica, o aproveitamento do rejeito de Sinter Feed como agregado na produção do concreto, é perfeitamente possível. Os valores e respectivas diferenças apropriadas e demonstradas à partir dos resultados obtidos, considerando-se a metodologia assumida na pesquisa, são uma comprovação inequívoca desta possibilidade.

A gama das análises e ensaios até então realizada, embora não tenha esgotado a totalidade das verificações possíveis de serem executadas, nos permite concluir com segurança neste sentido.

A maior conveniência deste aproveitamento, tendo em vista o peso do agregado, se apresenta mais adequado para elementos assentes sobre o terreno, elementos diversos de pavimentação, podendo inclusive ser estendido a blocos de concreto para alvenarias, também assentes sobre o terreno em baldrame ou sapatas corridas e ainda a estruturas de contenção, onde o peso também é fator preponderante.

As conclusões anteriores ficam também suficientemente ratificadas a partir da experiência levada a efeito no bairro Jardim Canadá, que **embora realizada com objetivos e material de origem diferente do aqui estudado**, está, até o momento, satisfatoriamente endossada pela sua similaridade e pela performance obtida no comportamento do pavimento. As Figuras 50 e 51 ilustram trechos da pavimentação executada.



Figura 50 – Vista de trecho do bairro Jd. Canadá em Nova Lima pavimentado com bloquetes produzidos com material semelhante ao da presente pesquisa

Fonte: Arquivo pessoal, 2007.



Figura 51 – Vista de trecho do bairro Jd. Canadá em Nova Lima pavimentado com bloquetes produzidos com material semelhante ao da presente pesquisa

Fonte: Arquivo pessoal, 2007.

Do ponto de vista da conveniência ecológica do aproveitamento deste rejeito, não há também a menor sombra de dúvida. **A implementação do emprego deste material como agregado para o concreto, em alternativa de substituição das areias naturais, traria vantagens significativas ao meio ambiente e às próprias mineradoras.**

Enfim, não seria exagero considerar que o emprego e aproveitamento deste rejeito constituem uma tecnologia nova e adequada na produção do concreto para as finalidades então descritas.

Do ponto de vista econômico faz-se conveniente complementar, em cada caso, uma análise econômica específica, devido, exclusivamente, à questão do peso do agregado. Um segundo transporte do produto acabado, dependendo da distância, pode não constituir a melhor alternativa, vindo a estabelecer margens pequenas de vantagem. Daí razão pela provável condição de produção vir a ser vantajosa: a fabricação das peças preferencialmente no local da aplicação, geralmente viável em empreendimentos maiores, tais como conjuntos habitacionais, implantação e/ou pavimentação de novas ruas ou bairros, etc.

6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados alcançados no desenvolvimento desta pesquisa, outras ações seriam recomendáveis para o sucesso da tecnologia:

- Desenvolver e testar dosagens experimentais, pelos processos clássicos preconizados nos métodos disponíveis, considerando, em procedimentos tecnológicos, a especificidade do rejeito;
- Desenvolver estudos e ensaios para se concluir sobre a durabilidade das peças produzidas com o rejeito (ensaios acelerados de durabilidade);
- A perspectiva futura de uma maior separação do ferro neste rejeito, através de operações de jigagem, deverá viabilizar ainda mais este aproveitamento, melhorando-lhe as condições de peso próprio. Esta postura, inclusive, já vem sendo adotada pela mineradora Itaminas, que instalou e iniciou, desde junho/2008 a sua unidade de jigue, reprocessando todo o seu estoque de rejeitos, reduzindo o Fe (presente na hematita, limonita e goethita) para percentuais de 35% a 40% e, conseqüentemente, aumentando a sílica para a faixa de 40% a 45%. As primeiras amostras do processamento do rejeito de sinter feed, após as operações de jigue, já produziram um material (2° rejeito) 10% mais leve que o rejeito original, com as seguintes características:

- Massa aparente = 1,670 kg/dm³
- Massa real = 3,430 kg/dm³
- Material pulverulento = 5,0 %
- Torrões de argila = 0,0 %

Segundo a engenharia da mineradora, espera-se com o desenvolvimento e maior conhecimento e domínio do processo a obtenção de maior eficiência na recuperação do Fe, conduzindo a obtenção desse 2° rejeito ainda mais leve.

- Estabelecer, divulgar e desenvolver o mercado para este insumo, explorando como apelo de convencimento as suas vantagens ecológicas e, certamente, de preço;
- Buscar estabelecer uma política de incentivos fiscais, através de vantagens tributárias, coordenada em nível estadual e municipal, para os produtos, ecologicamente corretos, produzidos com este material (secretarias estaduais de meio ambiente e fazenda).

REFERÊNCIAS

ABCP. Associação Brasileira de Cimento Portland. ET 27 – **Pavimentação com blocos pré-moldados de concreto**. Rio de Janeiro: ABCP, 1998.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 52. **Agregado miúdo** – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 6p.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 53. **Agregado graúdo** – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 8p.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004 – **Resíduos sólidos – classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10005 – **Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10007. **Amostragem de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7216. **Amostragem de agregados**. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5564. **Lastro-padrão (LP) para via férrea**. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7211. **Agregados para concreto**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7217. **Determinação da composição granulométrica do agregado**. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7218. **Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis**. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7219. **Determinação do teor de materiais pulverulentos**. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7220. **Determinação de impurezas orgânicas húmicas em agregado miúdo**. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7221. **Ensaio de qualidade de agregado miúdo**. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7251. **Agregado em estado solto** – determinação da massa unitária. Rio de Janeiro: ABNT, 1982.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9211. **Agregados miúdos**. Rio de Janeiro: ABNT, 1983.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9774. **Verificação da reatividade potencial pelo método químico**. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9776. **Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do Frasco de Chapman**. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9780. **Peças de Concreto para Pavimentação - Ensaio de Compressão**. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9781. **Peças de concreto para pavimentação**. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ABNT. NBR 10006 – **Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12.118. **Bloco Vazado de Concreto Simples para Alvenaria. Método de Ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12.042. **Rochas para revestimento; materiais inorgânicos, determinação do desgaste por abrasão**. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ABRÃO, P. C. Sobre a deposição de rejeitos de mineração no Brasil. Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais de Mineração, REGEO'87, Rio de Janeiro, **Anais**, v.1, p.1-19, 1987.

ALBUQUERQUE, Alexandre Serpa. Agregados. Cap. 4. In: BAUER, Luiz Alfredo Falcão. **Materiais de construção**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1994, p.63-120.

AL-ZAID, R. Z. et al. Investigation of potential use of electric-arc furnace dust (EAFD) in concrete. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v.27, n.2, p. 267-278, 1997.

ASTM-E 303-93. **Standard method for measuring frictional properties using the british pendulum tester**. ASTM Standards, v. 04.03, 1998, 5p.

ASTM C 294. **Standard Descriptive Nomenclature for Constituents of Concrete Aggregates**. ASTM Standards, 1991.

CARVALHO, M. D. Pavimento de concreto: reduzindo o custo social. **Associação Brasileira de Cimento Portland**, março 2007. 17p.

CHAMMAS, R. **Barragens de contenção de rejeitos**. Monografia. [Especialização em Engenharia de Barragens, Universidade Federal de Ouro Preto, CEEB.]. Ouro preto: UFOP, 1989.

COPEL. **Pavimentos intertravados**. Disponível em <<http://www.tuboscopel.com.br/pavimentos-intertravados.php>>. Acesso em 22 set. 2009.

CRUZ, Arthur Adelino de Freitas. **Estudo sobre a utilização do resíduo da queima da biomassa em argamassas**. [Dissertação. Mestrado em Engenharia de Materiais e Processos Avançados. Área de Concentração em Reciclagem de Resíduos Sólidos. Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade Estadual de Santa Catarina (UDESC). 99p.]. Joinville, SC: UDESC, 2002.

CRUZ, Luiz Otávio Maia. **Pavimento intertravado de concreto: estudo dos elementos e método de dimensionamento**. [Dissertação. Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.] Rio de Janeiro: UFRJ, 2003.

DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. ME 089 – **Ensaio acelerado de durabilidade do agregado**.

DNPM. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral Brasileiro**. Rio de Janeiro: DNPM, 2004, p.71-72.

FIORITI, César Fabiano; AKASAKI, Jorge Luis; INO, Akemi. **Fabricação de pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de recauchutagem de pneus**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, USP, 2006. Disponível em <<http://www.ppgec.feis.unesp.br/producao2006/36.pdf>> Acesso em 06 jul. 2009.

GIAMMUSSO, S. E. **Manual do Concreto**. São Paulo: Pini, 1992. 145p.

GOMES, R. C.; OLIVEIRA FILHO, W. L.; RIBEIRO, L. F. M. **Laudo Pericial da ruptura do dique de contenção de rejeitos de minério de ferro da Cava C1 da Mineração rio Verde Ltda., localizada no município de Nova Lima, MG**. Belo Horizonte: Ministério Público de Minas Gerais, 2001. 22p.

GUMIERI, Adriana Guerra. **Estudo do adensamento e liquefação sob carregamento estático de dois rejeitos de mineração**. [Dissertação. Mestrado em Engenharia. Universidade Federal de Viçosa, MG.]. Viçosa, MG: UFV, 1995.

HELENE, Paulo Roberto do Lago (coord.); CARMONA FILHO, Antônio; DAL MOLIN, Denise C. Coitinho; CINCOTTO, Maria Alba; et al. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ciminias, 1999.

IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. **Dados Estatísticos. 2009**. Disponível em <http://www.ibram.org.br/003/00316004.asp?rdCampoPesquisado=1&btBuscar=Buscar&ttBuscar=&ttOrderBy=1&ttPagina=23&slCD_GRUPO_CONTEUDO=>> Acesso em 30 ago., 2009.

INTERPAVI. **Comparativo Técnico: Piso Intertravado x Asfalto x Paralelepípedo**. Disponível em <www.interpavi.com.br/brazil/tecnico.htm>. Acesso em 26 jul. 2009.

KESLER, C. E. Progress in concrete technology. In: MALHOTRA, V. M. (ed.) **Concrete**. Ottawa: Canmet, 1980, p.1-23.

LIDDLE, B. T. Construction for sustainability and the sustainability of the construction industry. In: CIB TG 16 SUSTAINABLE CONSTRUCTION. Proceedings. 1994, Tampa, Florida, United States. **Anais...** Florida, United States, 1994, p.47-56.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: estrutura, propriedade e materiais. São Paulo: Pini, 1994

MEHTA, P. K. Concrete technology. **Concr Int**, [s.l.], v.21. n.11, p.47-53, nov.1999.

MEHTA, P. K. Concrete. **Concr Int**, [s.l.], v.23, n.10, p.61-66, 2001.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete**: microstructure, properties and materials. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2006.

MORGENSTERN; N. R.; KÜPPER, A. M. A. G. Hydraulic fill structures: a perspective. Specialty Conference on hydraulic fill structures, ASCE, Fort Collins, USA. **Proceedings**, 1988.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: PINI, 1997.

OLIVEIRA E SOUZA, Eduardo Bezerra. **Escórias de aciaria e resíduos de concretos refratários em componentes de pavimentação**. [Dissertação. Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais. 128p.]. Belo Horizonte: UFMG, 2007, p.55-77.

PAVERTECH. Pisos de concreto. Disponível em < <http://www.pavertech.com.br/pisos.html>>. Acesso em 30 ago. 2009.

PBC COMPANIES. 2007. Disponível em:
<http://www.concretedecor.net/All_Access/808/artisan_in_concrete-PBC.cfm>.
Acesso em 10 jun. 2009.

PEREIRA, E. L. **Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático**. Relatório. [Iniciação Científica, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.] Ouro Preto: UFOP, 2001. 55p.

PEREIRA, E. L. **Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático**. [Dissertação. Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Ouro Preto. 185p.] Ouro Preto: UFOP, 2005.

PIOROTTI, J. L. **Pavimentação intertravada**. Rio de Janeiro: Montana S.A., 1985. 64p.

PITTA, Márcio Rocha. **Pavimento de concreto**: um moderno ovo de Colombo? Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1998.

PRADO FILHO, José Francisco do; SOUZA, Marcelo Pereira de. O licenciamento ambiental da mineração no Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais: uma análise da implementação de medidas de controle ambiental formuladas em EIAs/RIMAs.

Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v.9, n.4, p.343-349, dez. 2004.

PRESOTTI, E. S. **Influência do teor de ferro nos parâmetros de resistência de um rejeito de minério de ferro**. [Dissertação. Mestrado em Engenharia civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.] Ouro Preto: UFOP, 2002. 153p.

QUARESMA, G. L. F. da F. Otimização de misturas binárias de agregados graúdos para produção de concreto. In: **9º Simpósio Internacional de Iniciação Científica**, 2001, São Paulo. 9º SIICUSP-CD ROM. 2001.

RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. S.; STARLING, T. **Materiais de Construção Civil**. 2 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006. 101p.

RIBEIRO, F. H. M. **Tecnologia do concreto**: agregados para construção civil. Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP), ULBRA. Palmas, TO, 2009. Disponível em <www.ulbra-to.br/DownloadArquivo.aspx?idArquivo=9c6e2514>. Acesso em 18 set. 2009.

RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de Dosagem de Concreto**. ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. ET-67. 2 edição, reimpressão. São Paulo: ABCP, 1995. 26p.

SAMPAIO, João Alves; CARVALHO, Eduardo Augusto. **Brita**: Pedreira Vigné. Comunicação Técnica. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral, Ministério da Ciência e Tecnologia, Coordenação de Inovação Tecnológica (CTEC), 2002. Disponível em <<http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTS/CT2002-190-00.pdf>>. Acesso em 28 ago. 2009.

SANTOS, A. G. **Influência do teor de ferro na condutividade hidráulica de um rejeito de minério de ferro**. [Dissertação. Mestrado em Engenharia civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.] Ouro Preto: UFOP, 2004. 191p.

SENÇO, Wlastermiller de. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 5ª tiragem. São Paulo: Pini, 2005.

UNI-STEIN DO BRASIL. **Compare a melhor relação custo/benefício**: mais benefícios do que custos. Setembro 2008. Disponível em <www.unistein.com.br/fique_baixo/asp>. Acesso em 02 ago. 2009.

VARGAS, A. S. **Estudo da viabilidade do uso do pó de aciaria elétrica a arco na confecção de blocos de concreto para pavimentação**. [Dissertação. Mestrado em Engenharia. Universidade Federal do rio Grande do Sul. 166p.]. Porto Alegre: UFRGS, 2002.

WILSON, E. O. **Consilience**: the unity of knowledge. New York: Alfred Knof, 1998.



FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS
Setor de Tecnologia Mineral - SDM
Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC
Av. José Cândido da Silveira nº. 2000, Belo Horizonte - MG
Fone: (31) 3489-2362/2363 Fax: (31) 3489-2360

CERTIFICADO DE MINERALOGIA E DIFRAÇÃO DE RAIOS – X

CLIENTE: Ayrton Vianna

AMOSTRA: Rejeito do Processo de Separação Magnética em WDRE.

RESULTADO

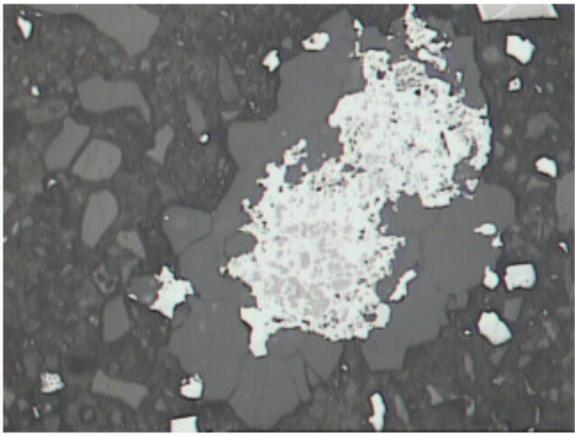
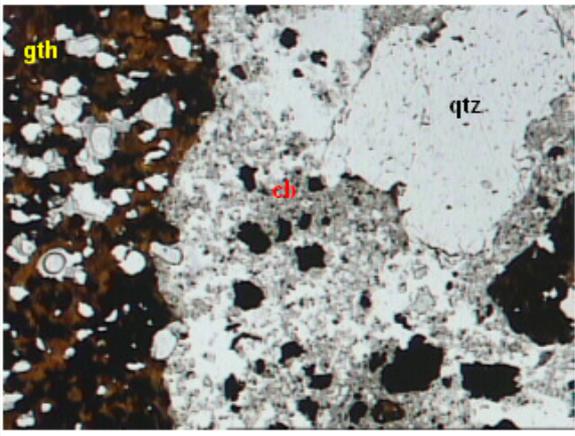
- Maiores constituintes: hematita e quartzo.
- Menores constituintes: goethita; anatásio, fosfato de alumínio hidratado ou fosfato de alumínio; óxido de manganês hidratado.

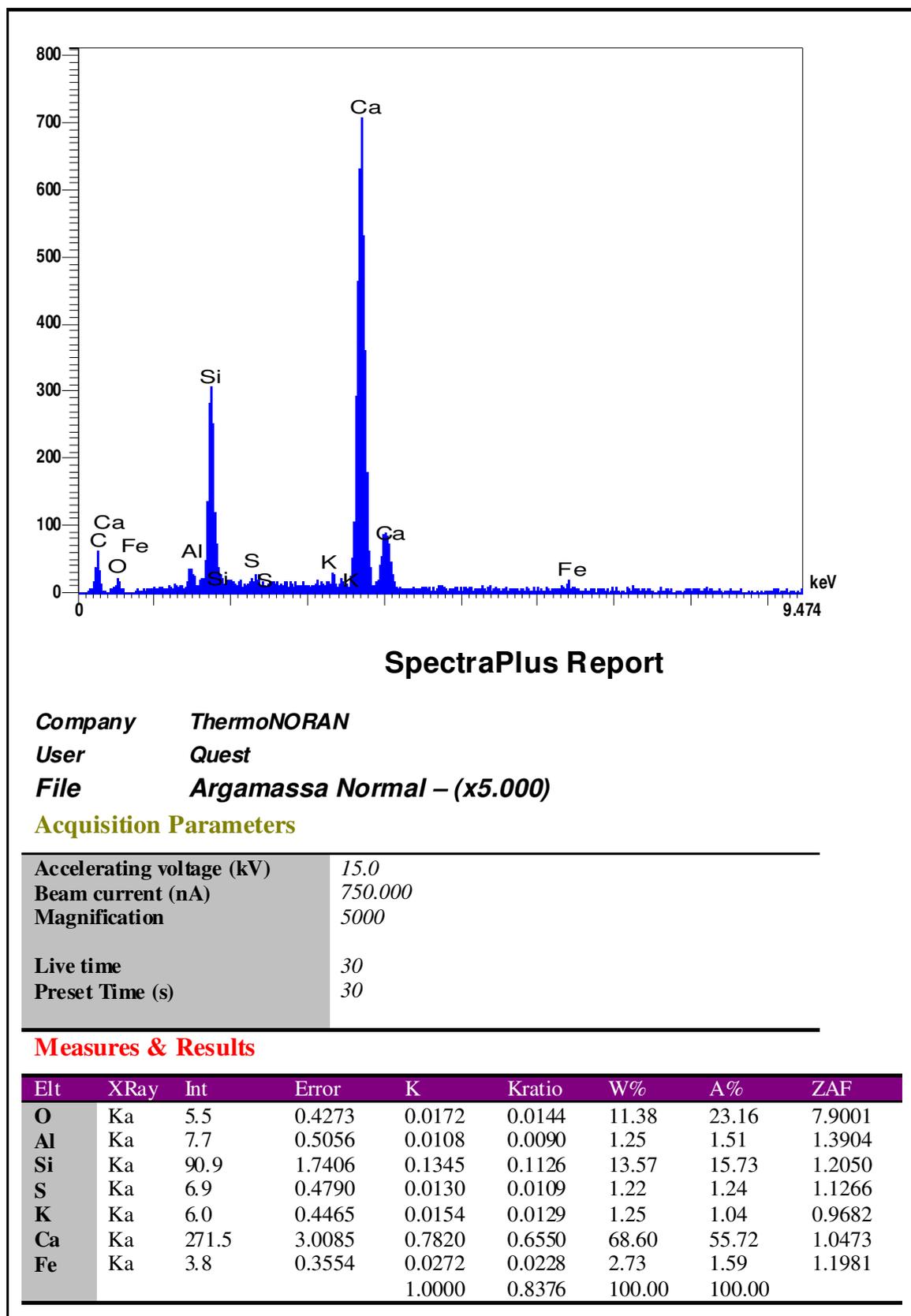
Observação: Existe limonita em abundância que o Raio –X não detecta. Este rejeito limonítico contém P.

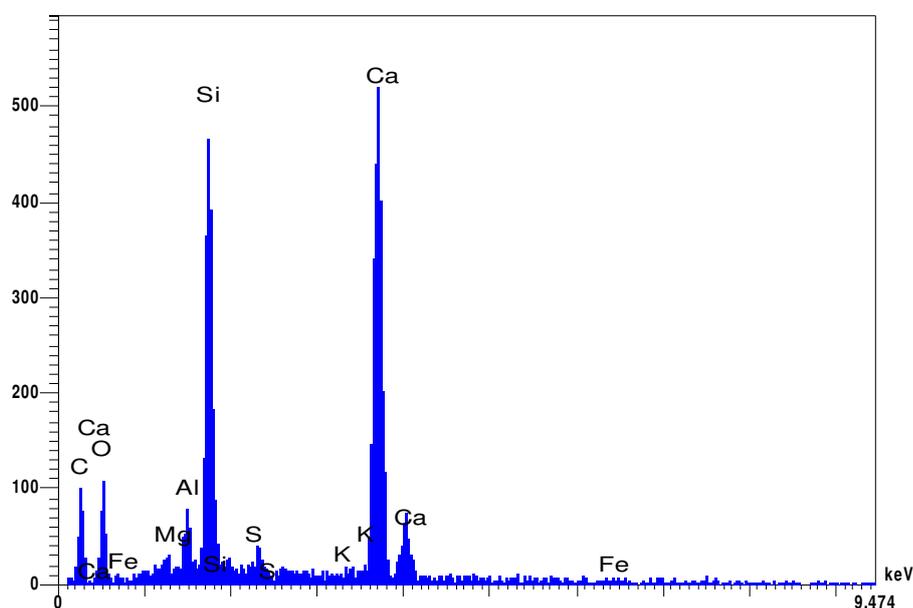
Belo Horizonte, 18 de outubro de 2006.

Angelo Carlos Maffei
Coordenador do Setor de Tecnologia Mineral

Anexo 2

FICHA DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA	
Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - Setor de Tecnologia Mineral	
Laboratório de Mineralogia e Microscopia	
Identificação da amostra:	Corpo de prova de argamassa endurecida de cimento e rejeito de sinter feed
Tipo de Preparação:	1 Lâmina Delgada e 2 Seções Polidas
Minerais Identificados em Microscópio (em ordem decrescente de abundância)	
Minerais Essenciais:	Goethita, Hematita, Quartzo
Minerais Acessórios:	Magnetita, Caulinita, Turmalina
Minerais e Processos de Alteração:	Magnetita em estágio avançado de alteração para Hematita (martitização). Hematita em estágio intermediário a avançado de alteração para goethita.
Descrição em Seção Polida (Luz Refletida)	Fotomicrografia
Quartzo anédrico de granulometria variando desde muito fina (<0,01 mm) a muito grossa (>0,22 mm), ocorre liberado e disseminado pela amostra. Hematita de granulação inferior à do quartzo, ocorre liberada. Goethita/limonita de pouco a muito porosa, apresenta-se com restos de hematita. Magnetita ocorre somente como restos nas hematitas. Partículas mistas compostas por goethita/limonita + hematita + quartzo, hematita + goethita/limonita e quartzo + hematita também ocorrem. Caulinita ocorre associada à goethita. Foto: Hematita martítica com restos de magnetita inclusa/associada ao quartzo.	
	Polarização: Nicóis Paralelos
	Aumento: 200x
Descrição em Lâmina (Luz Transmitida)	Fotomicrografia
Todos os constituintes identificados, conforme descrito acima, encontram-se imersos numa matriz finíssima de provável carbonato. Foto: Partículas de goethita (gth), quartzo (qtz) e aspecto da matriz (cb).	
	Polarização: Nicóis Paralelos
	Aumento: 50x





SpectraPlus Report

Company ThermoNORAN
User Quest
File Argamassa Sinter Feed – (x2.000)

Acquisition Parameters

Accelerating voltage (kV)	15.0
Beam current (nA)	750.000
Magnification	2000
Live time	30
Preset Time (s)	30

Measures & Results

Elt	XRay	Int	Error	K	Kratio	W%	A%	ZAF
O	Ka	26.4	0.9382	0.0913	0.0592	33.14	52.22	5.6004
Al	Ka	15.9	0.7279	0.0246	0.0159	2.21	2.07	1.3892
Si	Ka	142.5	2.1794	0.2322	0.1504	18.49	16.60	1.2292
S	Ka	7.9	0.5132	0.0164	0.0106	1.27	1.00	1.1979
K	Ka	1.1	0.1912	0.0031	0.0020	0.21	0.14	1.0528
Ca	Ka	196.4	2.5588	0.6230	0.4036	43.93	27.64	1.0885
Fe	Ka	1.2	0.1990	0.0094	0.0061	0.74	0.34	1.2236
				1.0000	0.6479	100.00	100.00	

 Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais Av. José Cândido da Silveira, 2000 - Bairro Horto Telefone (31) 3489-2000 - Fax (31) 3489-2200 31170-000 - Belo Horizonte - MG - Brasil	Setor de Análises Químicas

Folha
1/2

LABORATÓRIO DE DIFRATOMETRIA DE RAIOS X

Guia de Autorização de Serviços (GAS) Nº: 72768

Objeto: uma amostra de rejeito de minério

Natureza do trabalho: determinação por difratometria de Raios X, segundo procedimentos do laboratório

Data de recebimento	Data de conclusão	Data de emissão
16-11-2006	17-11-2006	21-11-2006


 Luiz Carlos Moutinho Pataca
 CRQ/MG 02100629
 Resp. pelo Laboratório de Raios X


 Olga Maria Ferreira Rocha
 CRQ/MG 02100224
 Coord. do Setor de Análises Químicas

CETEC - SDM

Av. José Cândido da Silveira, 2000
 Horto
 31170-000 Belo Horizonte - MG

*Os resultados apresentados referem-se exclusivamente à(s) amostra(s) enviada(s) pelo cliente.
 O CETEC autoriza a reprodução deste certificado, desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral.*





Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais

Av. José Cândido da Silveira, 2000 - Bairro Horto
 Telefone (31) 3489-2000 - Fax (31) 3489-2200
 31170-000 - Belo Horizonte - MG - Brasil

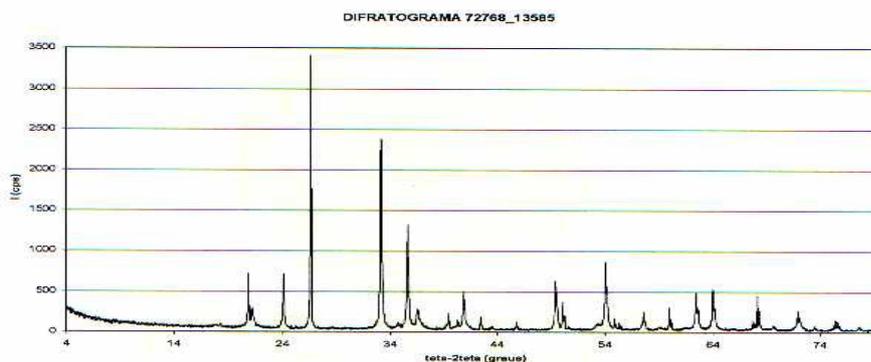
Setor de
 Análises
 Químicas

Certificado de Ensaios Nº 620807

Folha
 2/2

1 Resultados

Amostra		Resultados
Id. laboratório	Id. cliente	
72768/13585	Sem identificação	O difratograma apresenta fases cristalinas compatíveis com: Hematita e quartzo como maiores constituintes, Goetita, anatásio, fosfato de alumínio hidratado ou fosfato de alumínio e óxido manganês hidratado como menores ou constituintes traços.



2 Características dos instrumentos utilizados no ensaio:

Equipamento de difração de Raios X, marca Shimadzu, modelo Lab XRD 6000, com tubo de cobre 2,0 KV.

3 Condições operacionais:

3.1 Analista:

3.1.2 Vitor José Pinto Gouveia - CRQ/MG 02100711



Anexo 6

	RELATÓRIO DE SERVIÇOS	DATA
		14/11/2006
		RELATÓRIO Nº:
		657-06
		FOLHA:
		01

1. CLIENTE: AYRTON VIANNA COSTA
2. OBJETO: ENSAIOS GEOTÉCNICOS
3. OBRA: ESTUDO DE VIABILIDADE DO AGREGADO
4. TRECHO: -
5. APRESENTAÇÃO:

A Solocap Tecnologia e Serviços de Engenharia apresenta neste relatório Nº 657-06, os resultados dos ensaios geotécnicos executados em amostras enviadas ao nosso laboratório de sua obra acima identificada.

6. AMOSTRAS RECEBIDAS:

AMOSTRA	MATERIAL	PROCEDÊNCIA
01	Rejeito Sinter Feed	Mina de Jangada – Itaminas - Sarzedo

7. ENSAIOS EXECUTADOS:

ORDEM	ENSAIOS	QTD	MÉTODO
01	Durabilidade (Sulfato de Magnésio)	01	DNER-8994

8. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS:

ENSAIOS	UND	RESULTADO	
		ENCONTRADO	ESPECIFICADO
Durabilidade (Sulfato de Magnésio)	%	Amostra 1 2,01	< 12

Belo Horizonte, 14 de Novembro de 2006.


 Solocap Tecnologia e Serviços de Eng. Ltda.
 Cristiano Costa Moreira - CREA 61.510

	AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE AGREGADO MIÚDO (DNER ME - 89/64)					DATA:	14/11/2006
						RELATÓRIO:	657-06
						FOLHA:	2
CLIENTE: AYRTON VIANNA COSTA			ESTUDO: -				
EMPREITEIRA: -			PROCEDÊNCIA: MINA DE JANGADA - ITAMINAS - SARZEDO				
OBRA: ESTUDO DE VIABILIDADE DO AGREGADO			REGISTRO: 1285				
TRECHO: -			OPERADOR: PAULO ROBERTO				
SUB-TRECHO: -							
Composição Granulométrica		Peso (gr)	% Retida	Peso inicial (gr)	Peso final após os ciclos	% de perda	% de perda corrigida
Passando (mm)	Retido (mm)						
3/8"	4	110	20,0	110,0	107,0	2,73	0,55
4	8	110	20,0	110,0	107,2	2,54	0,51
8	16	110	20,0	110,0	108,2	1,64	0,33
16	30	110	20,0	110,0	108,2	1,64	0,33
30	50	110	20,0	110,0	108,6	1,45	0,29
TOTAL DO DESGASTE:				2,01			
Solução Empregada: Sulfato de Magnésio.							
Análise Qualitativa: Apresentou Desgastes Generalizados.							
Análise Quantitativa:							
Observações:							

LABORATÓRIO MINIMAX LTDA

À

ITAMINAS COMERCIO DE MINERIOS S/A
Fazenda da Engenho Seco s/n
Sarzedo – Minas Gerais

Análise de Agregado – Reatividade Potencial pelo Método Químico

1- Sílica dissolvida

Sd.....7 milimoles/litro

2- Redução da Alcalinidade

Ra..... 446 milimoles/litro

Belo Horizonte, 27/11/2006

**LABORATÓRIO MINIMAX LTDA**

César Salviano da Costa
Engº Agrº - CREA-MG 15396/D

Rua Mário Coutinho, 10 – Estoril – BH – MG//CEP 30570-310
Telefax (31) 3374-8100//Celular 8828-8826//minimax@oi.com.br

 Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais Av. José Cândido da Silveira, 2000 - Bairro Horto Telefone (31) 3489-2000 - Fax (31) 3489-2200 31170-000 - Belo Horizonte - MG - Brasil	Setor de Medições Ambientais	Folha
		Certificado de Ensaio Nº 211857

LABORATÓRIO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Cliente: Setor de Tecnologia Mineral - SDM

Endereço: Avenida José Cândido da Silveira, 2000
Horto
31170-000 Belo Horizonte, MG

Guia de Autorização de Serviços (GAS) Nº: 55380

Objeto: 01 (uma) amostra de resíduo sólido

Natureza do trabalho: Testes de solubilização, lixiviação de resíduo sólido e ensaio das concentrações dos constituintes nos extratos conforme SM e ABNT

Data de conclusão
06.12.2006

Data de emissão
13.12.2006


 José Antônio Cardoso
 Químico CRQ Nº 02100296
 Responsável pelo Laboratório
 Coordenador do SAM/CETEC

Os resultados apresentados referem-se exclusivamente à(s) amostra(s) descrita(s) no item 1.
 Nas situações aplicáveis, o arredondamento dos r^{p} apresentados neste certificado foi realizado segundo as prescrições da NBR 5891/1977.
 O CETEC autoriza a reprodução deste certificado, desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral.





Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais

Av. José Cândido da Silveira, 2000 - Bairro Horto
 Telefone (31) 3489-2000 - Fax (31) 3489-2200
 31170-000 - Belo Horizonte - MG - Brasil

Setor de
 Medições
 Ambientais

Certificado de Ensaio Nº 211857

Folha
 2/3

1 Identificação da amostra

Laboratório	Cliente
55380/2803	Rejeito de "Sinter FEED" oriundo da mina Jangada da Itaminas em Sarzedo-MG

2 Resultados

2.1 Teste de solubilização

Determinação / unidade	Amostra nº 55380/2803		Método de ensaio
	A	B	
pH inicial	6,9	7,1	ABNT NBR 9251/1986
pH final	6,7	6,9	ABNT NBR 9251/1986
Massa de material /g/L	500	500	—

2.2 Ensaio no solubilizado

Determinação / unidade	Amostra nº 55380/2803		Método de ensaio
	A	B	
Alumínio / mg/L	<0,10	<0,10	SM 3120 B
Arsênio / mg/L	<0,0003	<0,0003	SM 3114 B
Bário / mg/L	0,005	0,007	SM 3120 B
Cádmio / mg/L	<0,0005	<0,0005	SM 3113 B
Chumbo / mg/L	<0,005	<0,005	SM 3113 B
Cobre / mg/L	<0,004	<0,004	SM 3120 B
Cromo / mg/L	<0,04	<0,04	SM 3120 B
Ferro / mg/L	<0,03	0,08	SM 3120 B
Manganês / mg/L	0,012	0,018	SM 3120 B
Mercúrio µg/L	<0,20	<0,20	SM 3112 B
Prata / mg/L	<0,01	<0,01	SM 3120 B
Selênio / mg/L	<0,0005	<0,0005	SM 3114 B
Sódio / mg/L	0,45	0,93	SM 3120 B
Zinco / mg/L	0,05	0,15	SM 3120 B





Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais

Av. José Cândido da Silveira, 2000 - Bairro Horto
 Telefone (31) 3489-2000 - Fax (31) 3489-2200
 31170-000 - Belo Horizonte - MG - Brasil

Setor de
 Medições
 Ambientais

Certificado de Ensaio Nº 211857

Folha

3/3

2.3 Teste de lixiviação

Determinação /unidade	Amostra nº	Método de ensaio
	55380/2803	
Massa de material /g/L	100	—
pH final	5,1	ABNT NBR 9251/1986
pH inicial	6,0	ABNT NBR 9251/1986
Tempo de teste /h	27:00	—
Volume de CH ₃ COOH 0,5N /mL	0,6	—

2.4 Ensaio no lixiviado

Determinação /unidade	Amostra nº	Método de ensaio
	55380/2803	
Arsênio / mg/L	<0,0003	SM 3114 B
Bário / mg/L	0,007	SM 3120 D
Cádmio / mg/L	<0,0005	SM 3113 B
Chumbo / mg/L	<0,005	SM 3113 B
Cromo / mg/L	<0,04	SM 3120 D
Mercúrio / µg/L	<0,20	SM 3112 B
Prata / mg/L	<0,01	SM 3120 D
Selênio / mg/L	<0,0005	SM 3114 B

3 Referência bibliográfica

3.1 STANDARD methods for the examination of water and wastewater (SM) 21 ed. Washington: APHA, AWWA, WEF, 2005. 1v.

3.2 Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT.

4 Observações

Os resultados referem-se exclusivamente à(s) amostra(s) enviada(s) pelo cliente.

