

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**CARACTERIZAÇÃO E UTILIZAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO DE  
FERRO *PELLET FEED* EM PAVIMENTOS DE BLOCOS  
INTERTRAVADOS DE CONCRETO**

André Nillo Lopes Pires Guerra

Belo Horizonte

2014

**André Nillo Lopes Pires Guerra**

**CARACTERIZAÇÃO E UTILIZAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO DE  
FERRO *PELLET FEED* EM PAVIMENTOS DE BLOCOS  
INTERTRAVADOS DE CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Área de concentração: Materiais de Construção Civil

Linha de pesquisa: Resíduos com Materiais de Construção Civil

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Adriana Guerra Gumieri

**Belo Horizonte**

**Escola de Engenharia da UFMG**

**2014**

G934c

Guerra, André Nillo Lopes Pires.

Caracterização e utilização de rejeito de minério de ferro *PELLET FEED* em pavimentos de blocos intertravados de concreto [manuscrito] / André Nillo Lopes Pires Guerra. – 2014.  
124 f., enc.: il.

Orientador: Adriana Guerra Gumieri.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f.109-124.

Bibliografia: f. 104-108.

1. Construção civil - Teses. 2. Materiais de construção - Teses.  
3. Resíduos de construção civil - Teses. 4. Blocos de concreto - Teses.  
5. Minérios de ferro - Teses. I. Gumieri, Adriana Guerra. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 691(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

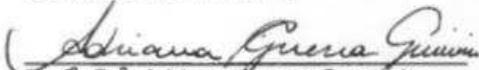
ESCOLA DE ENGENHARIA

**CARACTERIZAÇÃO E UTILIZAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO DE  
FERRO *PELLET FEED* EM PAVIMENTOS DE BLOCOS  
INTERTRAVADOS DE CONCRETO**

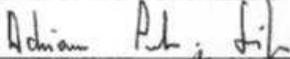
André Nillo Lopes Pires Guerra

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos 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.

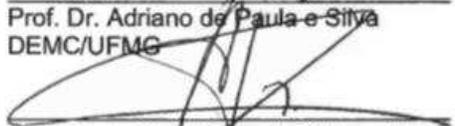
Comissão Examinadora:

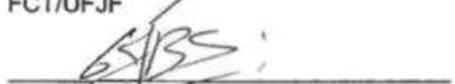
  
Prof.ª Dr.ª Adriana Guerra Gumeri

DEMC/UFMG - Orientadora



Prof. Dr. Adriano de Paula e Silva  
DEMC/UFMG

  
Prof. Dr. Antônio Eduardo Polisseni  
FCT/UFJF

  
Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva  
BEC/UFOP

*“Determinação, coragem e autoconfiança são fatores decisivos para o sucesso. Não importa quais sejam os obstáculos e as dificuldades. Se estamos possuídos de uma inabalável determinação, conseguiremos superá-los. Independentemente das circunstâncias, devemos ser sempre humildes, recatados e despidos de orgulho.”*

**Dalai Lama**

Com toda minha gratidão dedico este trabalho aos meus pais Sebastião e Maria da Glória, à minha esposa Fernanda e ao meu irmão Fillipi. Obrigado pela compreensão dos tantos momentos em que estive ausente devido aos estudos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por sua presença e força.

À minha esposa, pelo amor, apoio e compreensão.

À minha orientadora, Professora Adriana Guerra Gumieri, pelo apoio, dedicação e compreensão das minhas dificuldades e limitações.

À Anglo American, em especial a José Centeno e Leonardo Mitre, pela oportunidade, colaboração e incentivo.

Ao Alberto Lúcio, técnico do laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Engenharia da UFMG, pelo apoio nos ensaios de caracterização física e beneficiamento por separação magnética.

Ao José Antônio, técnico da Anglo American, pelo apoio nos ensaios de caracterização química.

À Ilda de Sousa, técnica do laboratório de Difração de Raios – X do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola de Engenharia da UFMG, pelo apoio nos ensaios de caracterização mineralógica.

Ao Professor Paulo Brandão, pelo apoio na interpretação dos difratogramas de caracterização mineralógica.

Aos funcionários do Laboratório de Concreto do Departamento de Materiais de Construção da Escola de Engenharia da UFMG, pelo apoio na confecção dos concretos e realização dos ensaios.

Ao Professor White José dos Santos, pelo apoio nos ensaios de resistência à compressão.

À Roberta, estagiária do Laboratório de Tecnologia de Rochas do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Engenharia da UFMG, pelo apoio nos ensaios de desgastes à abrasão.

Ao Professor Ayrton Vianna Costa, pelas dicas e apoio nas interpretações dos resultados obtidos.

## RESUMO

Atualmente, o Brasil ocupa o segundo lugar no *ranking* mundial dos produtores de minério de ferro. Essa produção é bastante expressiva na balança comercial do país. No entanto, as atividades de extração e beneficiamento de minério de ferro também proporcionam significativos impactos ambientais, principalmente pela geração e disposição de grandes quantidades de rejeitos. Visando a minimização desses impactos, as empresas mineradoras e pesquisadores vêm desenvolvendo estudos voltados para a otimização do processo de beneficiamento, reduzindo a quantidade gerada de rejeitos e/ou a utilização do rejeito como matéria prima em outros setores, destacando-se a construção civil. Dentro deste contexto, esta pesquisa tem por objetivo o estudo de viabilidade técnica da utilização de rejeito de minério de ferro *pellet feed* na produção de pavimentos de blocos intertravados de concreto. O rejeito foi submetido à caracterização física, química, mineralógica e ambiental. O rejeito é constituído basicamente por hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), e segundo normas brasileiras é classificado ambientalmente como um resíduo classe II A, não inerte. O rejeito apresentou propriedades físicas, químicas e ambientais satisfatórias para a sua utilização como material *filler* nos pavimentos intertravados. Nessa pesquisa foram avaliados três traços de concreto: um de referência e dois contendo adições de rejeito nas proporções de 5 e 10% da massa de cimento. Os corpos de prova de concreto foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão, absorção de água e resistência à abrasão. Na análise comparativa entre o concreto com 5% de rejeito e o de referência, o concreto com rejeito apresentou resistência característica estimada superior em 6,6%. O concreto com 10% de rejeito apresentou resistência característica estimada superior em 3% em relação ao de referência. O que indica a potencial utilização do rejeito na produção de pavimentos de blocos intertravados de concreto.

**Palavras-chave:** Rejeitos, *Pellet Feed*, *Filler*, Blocos Intertravados de Concreto.

## ABSTRACT

Today, Brazil is at the second place in the world ranking of iron ore producers. This production is very significant in the country's trade balance. However, the activities of mining and iron ore beneficiation also take to significant environmental impacts, especially relating to the generation and disposal of large amounts of tailings. In order to minimize these impacts, mining companies and researchers are developing studies aiming the optimization of the beneficiation process, reducing the amount of waste generated and/or the use of tailings as raw material to other sectors, especially construction works. In this context, this research aims to study the technical feasibility of using the iron ore pellet feed tailings in the production of floor interlocking concrete blocks. The tailings were subjected to physical, chemical, mineralogical and environmental characterization. The tailings consist, mainly, of hematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), quartz ( $\text{SiO}_2$ ) and kaolinite ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) and is environmentally classified as waste class II A, non-inert, according to Brazilian norm. The waste presented physical, chemical and environmental properties adequate for its use as a filler material in the interlocking pavements. In this study were assessed three concrete mixtures: a reference and two containing tailings additions in the proportions of 5 and 10% of the cement mass. The concrete samples were submitted to compressive strength tests, water absorption and abrasion resistance. Comparative analysis between the concrete with 5% of tailings and the reference, the concrete with characteristic resistance higher estimated presented tailings at 6.6%. The concrete with 10% of estimated characteristic resistance higher than presented tailings in 3% in relation to the reference. What indicates the potential use of tailings in the production of interlocked block concrete floors.

**Keywords:** Tailings, *Pellet Feed*, *Filler*, Interlocking concrete blocks.

## SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO.....	16
2- OBJETIVO.....	18
3- JUSTIFICATIVA.....	19
4- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	20
4.1- A produção do minério de ferro e a geração de rejeito .....	20
4.1.1- Considerações iniciais.....	20
4.1.2- Processo da mineração de ferro.....	21
4.1.3- Características dos rejeitos de mineração de ferro .....	28
4.1.4- Disposição dos rejeitos da mineração de ferro.....	30
4.1.5- Aplicação do rejeito na construção civil.....	32
4.2- Adições minerais.....	40
4.3- Pavimento intertravado .....	41
4.3.1- Considerações iniciais.....	41
4.3.2- Estrutura do pavimento intertravado.....	46
4.3.3- Produção de Peças Pré-Moldadas de Concreto.....	53
4.3.4- Critérios de aceitação das peças de concreto para pavimentação.....	54
5- MATERIAIS E MÉTODOS.....	58
5.1- Cimento Portland .....	58
5.2- Agregado graúdo .....	58
5.3- Agregado miúdo.....	59
5.4- Aditivo .....	60
5.5- Água.....	61
5.6- Rejeito de minério de ferro.....	61
5.6.1- Coleta das amostras.....	61
5.6.2- Métodos de caracterização do rejeito de <i>pellet feed</i> .....	61

5.7-	Dosagem dos traços de concreto.....	71
5.8-	Confecção dos corpos de prova de concreto .....	72
5.9-	Moldagem dos corpos de prova .....	73
5.10-	Ensaio de resistência à compressão .....	75
5.11-	Ensaio de absorção de água .....	77
5.12-	Ensaio de resistência à abrasão .....	79
6-	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	83
6.1-	Caracterização física do rejeito .....	83
6.2-	Caracterização química do rejeito.....	84
6.3-	Caracterização mineralógica do rejeito .....	85
6.4-	Caracterização ambiental do rejeito.....	88
6.5-	Resistência à compressão .....	92
6.6-	Absorção de água.....	94
6.7-	Desgaste à abrasão .....	96
7-	CONCLUSÕES.....	100
8-	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	103
	REFERÊNCIAS.....	104
	ANEXOS .....	109
	ANEXO 1- LAUDO DE ANÁLISE DE CLASSIFICAÇÃO DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO <i>PELLET FEED</i> .....	110
	ANEXO 2- CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND UTILIZADO NA PESQUISA.....	120
	ANEXO 3- FICHA TÉCNICA DO ADITIVO UTILIZADO NA PESQUISA.....	122

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificações granulométricas para rejeitos de minério de ferro .....	29
Tabela 2– Resistência à compressão e massa específica real .....	37
Tabela 3– Resistência à compressão .....	38
Tabela 4- Amostragem para ensaio .....	56
Tabela 5 – Composição química do cimento Portland CP V-ARI MAX.....	58
Tabela 6 – Caracterização física e mecânica do cimento Portland CP V-ARI MAX.	58
Tabela 7 – Composição granulométrica, dimensão máxima característica e massa específica do agregado graúdo .....	59
Tabela 8– Composição granulométrica, módulo de finura e massa específica do agregado miúdo.....	60
Tabela 9– Especificação do aditivo Rheomix 610 .....	60
Tabela 10 – Traços de concreto e o consumo de materiais por m <sup>3</sup> de concreto.....	72
Tabela 11- Composição granulométrica e massa específica do rejeito bruto .....	83
Tabela 12 – Composição química das amostras de rejeito.....	84
Tabela 13– Resultado dos ensaios de lixiviação da amostra de rejeito bruto .....	88
Tabela 14 – Resultado dos ensaios de solubilização da amostra de rejeito bruto ...	90
Tabela 15– Resistência à compressão do concreto de referência aos 28 dias.....	92
Tabela 16 – Resistência à compressão do concreto com 5% de rejeito aos 28 dias	92
Tabela 17 – Resistência à compressão do concreto com 10% de rejeito aos 28 dias .....	93
Tabela 18– Absorção de água dos concretos aos 28 dias.....	95
Tabela 19– Desgaste à abrasão do concreto de referência aos 35 dias.....	96
Tabela 20 – Desgaste à abrasão do concreto com 5% de rejeito aos 35 dias.....	97
Tabela 21 – Desgaste à abrasão do concreto com 10% de rejeito aos 35 dias.....	98

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxo típico de tratamento de minério – Modificado.....	22
Figura 2- Concepção de fluxo gravitacional em uma pilha de rejeitos .....	31
Figura 3- Métodos de disposição de rejeitos.....	33
Figura 4 - Pavimento de blocos de argila na cidade de Rio Branco – AC.....	43
Figura 5 - Pavimento pé de moleque na cidade de Paraty – RJ.....	44
Figura 6 - Pátio de armazenagem do Complexo Portuário do Pecém, Ceará.....	46
Figura 7- Estrutura típica do pavimento intertravado.....	47
Figura 8 – Formatos típicos de peças pré-moldadas de concreto.....	50
Figura 9 - Efeito da espessura das peças pré-moldadas de concreto no desempenho do pavimento .....	51
Figura 10 - Modelo de assentamento das PPC tipo espinha de peixe.....	52
Figura 11 - Modelo de assentamento das PPC tipo fileiras.....	53
Figura 12 - Modelo de assentamento das PPC tipo trama.....	53
Figura 13- Exemplos de peças de concreto Tipo I.....	55
Figura 14- Exemplos de peças de concreto Tipo II.....	55
Figura 15- Exemplos de peças de concreto Tipo III.....	55
Figura 16- Exemplos de peças de concreto Tipo IV.....	56
Figura 17- Peneiramento a úmido.....	63
Figura 18- Peneiramento a seco.....	63
Figura 19- Vista geral dos picnômetros e balança semi-analítica.....	64
Figura 20- LIMS - Separador magnético via úmida de baixa intensidade.....	66
Figura 21 - WHIMS - Separador magnético via úmida de alta intensidade.....	67
Figura 22- Espectrômetro de fluorescência de raios – X.....	69
Figura 23- Difratômetro de Raios-X.....	70
Figura 24 – Betoneira utilizada na confecção do concreto.....	73
Figura 25 – Fôrmas utilizadas na moldagem dos corpos de prova.....	74
Figura 26 – Mesa vibratória utilizada no adensamento dos concretos.....	74
Figura 27- Corpos de prova capeados com pasta de cimento.....	75
Figura 28- Corpos de prova imersos em tanque com água.....	76
Figura 29 – Prensa hidráulica utilizada no ensaio de compressão.....	76
Figura 30– Pesagem de corpo de prova.....	78

Figura 31– Secagem dos corpos de prova em estufa .....	78
Figura 32 – Abrazímetro utilizado no ensaio de abrasão .....	80
Figura 33– Serra circular utilizado no corte dos corpos de prova .....	80
Figura 34 – Definição dos pontos de monitoramento da amostra .....	81
Figura 35 – Monitoramento da espessura da amostra .....	81
Figura 36- Difratoograma do rejeito bruto – amostra 1.....	85
Figura 37- Difratoograma do não magnético do LIMS – amostra 2.....	86
Figura 38- Difratoograma do não magnético do WHIMS – amostra 3.....	86
Figura 39- Difratoograma do magnético do WHIMS – amostra 4.....	87

## LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 01 .....	64
EQUAÇÃO 02 .....	77
EQUAÇÃO 03 .....	79
EQUAÇÃO 04 .....	82

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CN	Consistência Normal
CP V-ARI	Cimento Portland Tipo V – Alta Resistência Inicial
CP	Corpo de Prova
DRX	Difratômetro de Raios-X
ECC	<i>Engineered Cementitious Composites</i>
EQ	Expansão a Quente
FEAM	Fundação Estadual de Meio Ambiente de Minas Gerais
FP	Fim de Pega
FRX	fluorescência de raios – X
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
ICDD	<i>International Centre for Diffraction Data</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IP	Início de Pega
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LD	Limite de Detecção
LIMS	<i>Low Intensity Magnetic Separator</i>
LQ	Limite de Quantificação
MG	Minas Gerais
NBR	Norma Brasileira Registrada
ND	Não Detectado
PF	Perda ao Fogo
RI	Resíduo Insolúvel
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UNCTAD	<i>United Nations Conference on Trade and Development</i>
VMP	Valor Máximo Permitido
WDS	<i>Wavelength Dispersive Spectrometer</i>
WHIMS	<i>Wet High Intensity Magnetic Separator</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

±	Mais ou Menos
≤	Menor ou Igual
>	Maior
#	Malha
%	Porcentagem
mL	Mililitro
mm	Milímetro
cm	Centímetro
m	Metro
g	Gramma
kg	Quilograma
kw	Quilowatt
atm	Atmosfera
MPa	Mega Pascal
°C	Grau Celsius
N	Nitrogénio
P	Fósforo
Mn	Manganês
C-S-H	Silicato Cálcico Hidratado
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de Cálcio
MgO	Óxido de Magnésio
SO <sub>3</sub>	Trióxido de Enxofre
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de Silício
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Ferro
Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	Caulinita
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Alumínio
CaO	Óxido de Cálcio
TiO <sub>2</sub>	Dióxido de Titânio
K <sub>2</sub> O	Óxido de Potássio
pH	Potencial de Hidrogénio

$\rho_r$	densidade do rejeito
$M_r$	massa do rejeito
$V_t$	volume total (água + rejeito)
$M_a$	massa da água
$\rho_a$	densidade da água
A/C	água/cimento
$f_{pk,est}$	resistência característica à compressão
$f_p$	resistência média
$t$	coeficiente de Student
$s$	desvio padrão
$f_{pi}$	resistência individual
$n$	número de corpos de provas
$A$	absorção do corpo de prova
$m_1$	massa do corpo de prova seco
$m_2$	massa do corpo de prova saturado
$P$	perda por desgaste
$A_1$	espessura no ponto 1 antes do ensaio
$A_2$	espessura no ponto 1 depois do ensaio
$B_1$	espessura no ponto 2 antes do ensaio
$B_2$	espessura no ponto 2 depois do ensaio
$C_1$	espessura no ponto 3 antes do ensaio
$C_2$	espessura no ponto 3 depois do ensaio
$D_1$	espessura no ponto 4 antes do ensaio
$D_2$	espessura no ponto 4 depois do ensaio

## 1- INTRODUÇÃO

Notadamente, o setor de mineração tem grande importância para a balança comercial, proporcionando bem estar e melhoria da qualidade de vida da população mundial, tornando-se cada vez mais indispensável para o desenvolvimento econômico, social e tecnológico. No entanto, esse setor também é responsável por um aumento significativo nos impactos ambientais, devido ao aumento do consumo dos recursos naturais não renováveis, a geração de mais efluentes e resíduos para o meio ambiente.

Segundo a *United Nations Conference on Trade and Development* (UNCTAD), o Brasil é o segundo maior produtor de minério de ferro, estando atrás apenas da Austrália. Em 2011, o Brasil produziu 390 milhões de toneladas de minério de ferro, o que equivale a 20% da produção mundial (IBRAM, 2012).

Analisando a distribuição das reservas mundiais cadastradas, o Brasil encontra-se em segundo lugar, com 16% do total de 180 bilhões de toneladas. Entretanto, considerando-se as reservas em termos de quantidade de ferro contido no minério, o país assume o primeiro lugar devido o alto teor de ferro na hematita (60% de ferro) e no itabirito (50% de ferro) (IBRAM, 2012).

Inerente à atividade de extração de minério de ferro, ocorre geração de enorme quantidade de rejeitos, sendo esses, resíduos do processo de beneficiamento do minério. Desta forma, as mineradoras necessitam em seu planejamento estudar a viabilidade técnica e econômica para a destinação ambientalmente correta e segura dos rejeitos gerados ao longo da vida útil da mina. Uma das destinações amplamente utilizada é a estrutura de barragem de rejeitos, porém, atualmente, já existem pesquisas voltadas para a utilização dos rejeitos como matéria-prima em outros setores, tais como, na indústria de cimento Portland e na construção civil.

Segundo Kovler (2010), a sustentabilidade da construção civil está diretamente relacionada ao desenvolvimento de novos materiais de construção, incorporando cada dia mais os resíduos de outros setores industriais, otimizando os sistemas de

extração e beneficiamento, fornecendo um produto de qualidade e de baixo impacto econômico, social e ambiental.

Dentro deste contexto, foi desenvolvido um estudo de viabilidade técnica da utilização do rejeito de minério de ferro *pellet feed* na produção de pavimentos de blocos intertravados de concreto, por meio do estudo das propriedades mecânicas e avaliação dos aspectos de qualidade dos corpos de prova produzidos com diferentes teores de adição do rejeito.

O estudo desenvolvido encontra-se organizado em 7 capítulos. Nos capítulos 2 e 3 apresentam-se os objetivos e as justificativas as quais motivaram a realização do presente estudo. No capítulo 4 apresenta-se a revisão bibliográfica, a qual descreve todo o processo da mineração de ferro até a produção do concentrado e a geração do rejeito. A partir do rejeito abordam-se as referências de caracterização e as principais técnicas atualmente aplicadas para a disposição dos rejeitos, ao final são apresentados estudos contemplando aplicações nobres do rejeito na construção civil, destacando o seu potencial de utilização. Ainda no capítulo 4 são apresentados aspectos relevantes referentes à pavimentação por blocos intertravados. Os materiais e os métodos adotados na pesquisa encontram-se descritos no capítulo 5. O capítulo 6 trata-se da apresentação e discussão dos resultados obtidos e no capítulo 7 às conclusões, seguidas do capítulo 8 com as sugestões para trabalhos futuros.

## 2- OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a viabilidade técnica do rejeito de minério de ferro *pellet feed* na produção de pavimentos de blocos intertravados de concreto. Nessa pesquisa desenvolveu-se o estudo da utilização do rejeito de minério de ferro *pellet feed* de uma planta de beneficiamento de escala piloto, localizada no município de Conceição do Mato Dentro, estado de Minas Gerais.

Os objetivos específicos são:

- Caracterizar o rejeito de *pellet feed* visando sua aplicação na construção civil;
- Avaliar possíveis teores de adição na produção de pavimentos de blocos intertravados de concreto;
- Estudar as propriedades mecânicas das peças intertravadas produzidas com o rejeito, por meio de ensaios de resistência à compressão;
- Avaliar o aspecto da qualidade das peças produzidas por ensaios de absorção e abrasão.

### 3- JUSTIFICATIVA

A preocupação com a conservação ambiental e a qualidade de vida das gerações futuras tem motivado cada vez mais iniciativas que visam a minimização dos impactos ambientais e a otimização dos recursos naturais não renováveis. Contudo, é imprescindível a implementação de diretrizes norteadoras para uma melhor gestão e gerenciamentos dos resíduos, visto que os resíduos são fontes nobres de matéria prima e energia que devem ser utilizadas ao máximo.

Neste contexto, o Brasil em 2010 instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que dentre outras diretrizes, estabelece uma ordem prioritária para a gestão e gerenciamento dos resíduos, tendo como foco principal a otimização dos recursos naturais, por meio da não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos.

Com base nestas diretrizes, a mineração vem investindo em tecnologia para maximizar a concentração mineral e reduzir a geração de resíduo do processo de beneficiamento. Porém, é fato que mesmo atingindo a concentração máxima, a redução da geração de rejeito será mínima, tornando-se necessário o desenvolvimento de estudos de viabilidade técnica para utilização do rejeito em outros seguimentos industriais.

Atualmente, já existem estudos para aplicação do rejeito da mineração em diferentes setores industriais, destacando-se a construção civil. No entanto, ressalta-se que especificamente para rejeito de minério de ferro *pellet feed* existem poucos estudos publicados, motivando a realização da presente pesquisa.

## **4- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **4.1- A produção do minério de ferro e a geração de rejeito**

#### **4.1.1- Considerações iniciais**

Rejeitos são materiais remanescentes do processo de beneficiamento e concentração de minérios em instalações industriais, cujas características granulométricas dependem do tipo de minério bruto a ser extraído (ferro, bauxita, ouro, etc.) e do processo industrial de beneficiamento, podendo abranger uma ampla faixa de materiais, desde grosseiros até solos de granulometria muito fina. Em função dos processos de beneficiamento, estes rejeitos podem ser ativos (contaminados) ou inertes (não contaminados) (PEREIRA, 2005).

Somente no estado de Minas Gerais, segundo o Inventário de Resíduos Industriais e Minerários de 2013 da FEAM (Fundação Estadual de Meio Ambiente de Minas Gerais), foram gerados aproximadamente 151 milhões de toneladas de rejeitos provenientes da mineração, representando 28,55% do total de resíduos inventariados no setor, sendo estes, 99,55% destinados internamente (FEAM, 2014).

Em geral, os rejeitos são dispostos por via úmida, através de barramentos construídos (barragens de contenção) com ou sem utilização dos próprios rejeitos. Também são dispostos por via seca, mediante as chamadas pilhas de rejeitos que, ao contrário das barragens, não têm o objetivo de reter líquidos conjuntamente com a matéria sólida descartada (PEREIRA, 2005).

No passado, os investimentos das mineradoras eram focados simplesmente na extração e beneficiamento de minérios, sendo os resíduos de seu processo (estéril e rejeito) tratados de forma secundária, assim como suas contenções. Dessa forma, as estruturas de contenção eram construídas sem qualquer controle. Com isso, diversos acidentes ocorreram ao longo da história da mineração, tornando estas estruturas foco de investimentos de melhorias, visando um maior controle e segurança (ARAUJO, 2006).

#### **4.1.2- Processo da mineração de ferro**

O processo de mineração pode ser definido como o conjunto de operações unitárias que, através da lavra e do beneficiamento do minério, tem como objetivo modificar as propriedades físicas do minério, aumentando a concentração química do elemento de interesse (neste caso o ferro) e removendo a maior quantidade de ganga, também conhecida como rejeito (SILVA, 2010).

Para a concentração do ferro é necessário que os minerais compostos no minério estejam fisicamente liberados. Esta liberação ocorre por meio de operações de redução de tamanho, a qual é definida como cominuição ou fragmentação, sendo as operações de britagem e moagem empregadas (LUZ e LINZ, 2010).

Para auxiliar a fragmentação e a redução dos custos operacionais adotam-se operações de classificação por tamanho, nos circuitos de cominuição, evitando a fragmentação excessiva e desnecessária (LUZ e LINZ, 2010).

Após a liberação dos minerais constituintes, os mesmos são submetidos à operação de segregação mineral, obtendo-se basicamente ao fim do processo um concentrado e um rejeito (LUZ e LINZ, 2010). A Figura 1 mostra um fluxo típico de tratamento de minério, modificado para a mineração de ferro.

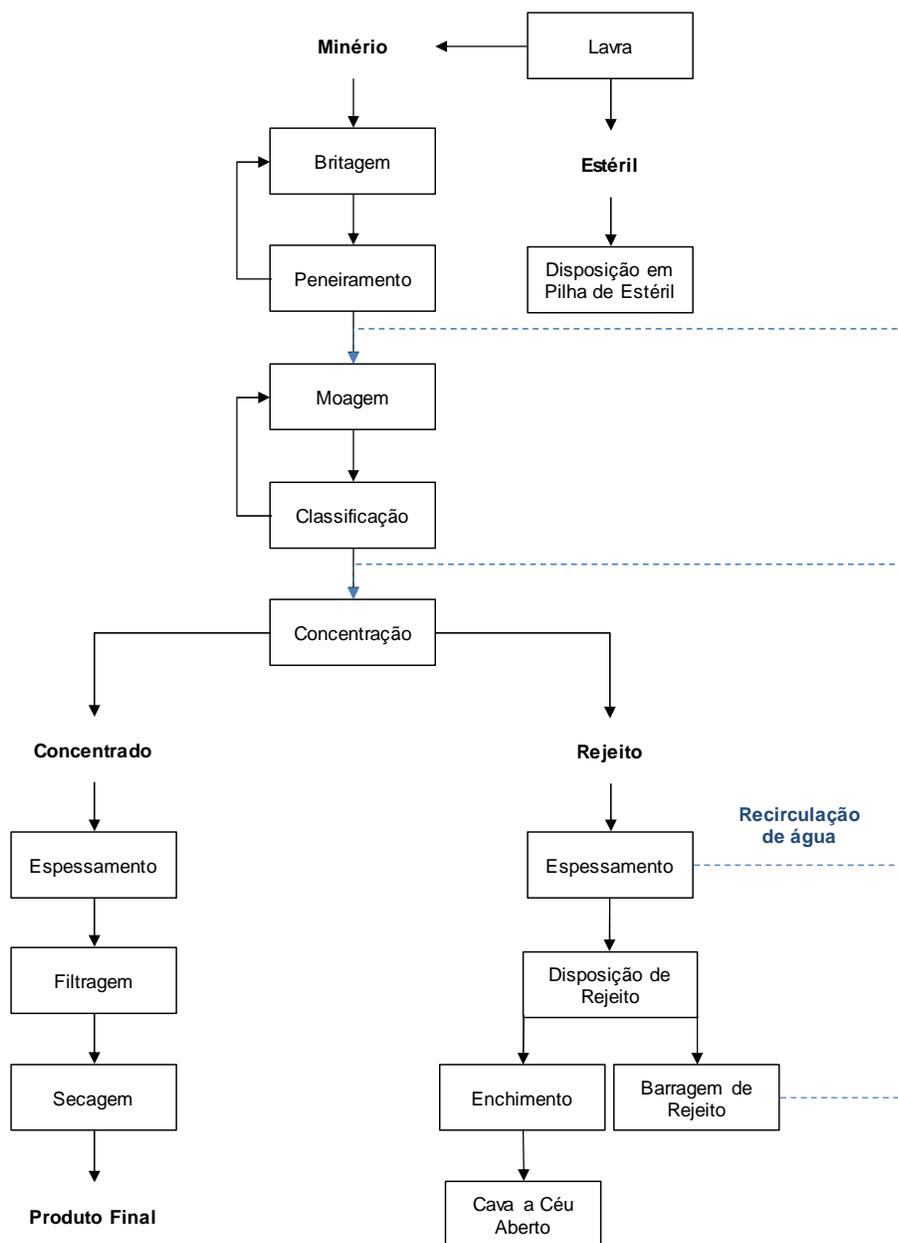


Figura 1 - Fluxo típico de tratamento de minério – Modificado

Fonte: Luz e Lins (2010)

A sequência apresentada na Figura 1 pode ser modificada de acordo com diversos fatores, sendo alguns deles: as características mineralógicas e os teores de minério de ferro da jazida a ser explorada, bem como o tipo de concentrado a ser produzido (PEREIRA, 2005; SILVA, 2010).

Seguindo a orientação do fluxo (Figura 1), a primeira etapa consiste na operação de lavra ou mina, que é basicamente o decapeamento (realizado utilizando-se equipamento escavadeira) e desmonte do maciço rochoso por explosivos. Essa etapa finaliza-se com o carregamento e o transporte do minério bruto para a usina de beneficiamento e também do estéril para a pilha de estéril (SILVA, 2010). Nos itens 4.1.2.1 a 4.1.2.6 são descritas as etapas de beneficiamento do minério conforme orientação do fluxo.

#### **4.1.2.1- Britagem e moagem**

No processo de beneficiamento de minérios a operação de cominuição, ou fragmentação, envolve um conjunto de operações unitárias que tem por objetivo reduzir, por força mecânica, o tamanho de uma rocha em fragmentos de tamanho menor e liberar o (s) mineral (ais) de interesse dos minerais de ganga (FIGUEIRA *et al.*, 2010).

Na operação de fragmentação a britagem é a primeira etapa a ser realizada e tem a função de fragmentar os blocos extraídos na mina até sua adequação ao processo de beneficiamento subsequente. Neste caso, a britagem deve ser repetida por diversas vezes, mudando-se o equipamento até que se obtenha a granulometria adequada para a alimentação da moagem (FIGUEIRA *et al.*, 2010).

A moagem é a última etapa de redução do tamanho da rocha. Trata-se de uma fragmentação fina, a qual gera um produto adequado para a operação de concentração mineral (FIGUEIRA *et al.*, 2010).

As operações de britagem e moagem diferem entre si pela faixa granulométrica e pela forma de redução dos tamanhos das partículas. A britagem reduz o tamanho das partículas por meio de forças de compressão, impacto ou cisalhamento, exigindo uma granulometria (150 cm a 3 cm) maior para se desenvolver. Já o processo de moagem se restringe às frações mais finas (1,9 cm a 1,3 cm) e utiliza mecanismo de abrasão e quebra de arestas (CHAVES e PERES, 2009).

No processo de cominuição do minério de ferro, a moagem, além de outras finalidades, tem por objetivo a produção do concentrado *pellet feed* que pela sua baixa fração granulométrica ( $< 0,15$  mm) permite o seu transporte em minerodutos e a pelotização (CHAVES e PERES, 2009).

#### **4.1.2.2- Classificação e peneiramento**

Para auxiliar as operações de britagem e moagem adota-se o peneiramento e a classificação dos fragmentos minerais. O peneiramento é a operação de segregação granulométrica em duas frações de tamanhos diferentes que se dão por meio de um gabarito de abertura fixa. A faixa de segregação granulométrica submetida ao peneiramento vai desde matações de 0,46 m a talco de 130  $\mu$ m (CHAVES e PERES, 2009).

A classificação é a operação de segregação com base no conceito da velocidade em que os grãos atravessam um determinado fluido, sendo normalmente aplicada à úmido para granulometria muito fina (5 mm a 0,05 mm), no qual o peneiramento a seco não é eficiente (CORREIA, 2010).

#### **4.1.2.3- Concentração**

Após as operações de cominuição do minério de ferro, aplicam-se as operações de concentração que visam separar as partículas de ferro dos demais minerais. A concentração dos minerais pode ocorrer por meio da concentração gravítica, separação magnética, separação eletrostática e/ou flotação.

A concentração gravítica é uma das formas mais antigas de concentração mineral, na qual partículas de diferentes propriedades físicas são separadas por ação da força de gravidade ou por forças centrífugas (LINS, 2010).

Segundo Lins (2010), a eficiência da concentração gravítica está relacionada com a escolha adequada do equipamento e controle dos fatores: taxa de alimentação, faixa granulométrica, percentagem de sólidos e outros.

A separação magnética é um método com alta capacidade de remoção de minerais de ferro, que por permitir a sua aplicação tanto a seco como a úmido, é uma técnica considerada ambientalmente correta, viabilizando o seu uso em regiões de baixa disponibilidade hídrica. Além disso, apresenta consagrada aplicação na concentração de diversas outras substâncias minerais, dependendo da susceptibilidade magnética da espécie mineralógica (SAMPAIO *et al.*, 2010).

O método de concentração mineral por separação eletrostática está condicionado, entre outros fatores, ao sistema que gera as cargas superficiais nos minerais a serem segregados, sendo sua eficiência associada às diferenças de algumas das propriedades do minério, podendo citar: susceptibilidade em adquirir cargas elétricas superficiais, condutividade elétrica, granulometria, densidade, forma geométrica, etc. (SAMPAIO *et al.*, 2010).

No método de separação por flotação as partículas são dispersas em uma solução aquosa, contendo dentre outras, substâncias tensoativas que controlam as propriedades de superfície das partículas de ganga quartzosa, tornando-as hidrofóbicas para uma separação efetiva. As partículas hidrofobizadas apresentam baixa afinidade com a água, favorecendo a interação com as bolhas de ar, que por sua vez, absorvem as partículas formando uma espuma na superfície do tanque, onde são removidas do processo (MONTE e PERES, 2010).

Com aplicação do processo de concentração ao fim são obtidos dois produtos, um concentrado e um rejeito, ambos dispersos em alta concentração de água em forma de polpa. Neste caso, tanto o concentrado quanto o rejeito são submetidos ao desaguamento.

#### **4.1.2.4- Espessamento e filtragem**

As operações de espessamento e filtragem, denominadas de processo de desaguamento, têm por objetivo reduzir a umidade da polpa de concentrado e de rejeito para a sua destinação final (venda ou disposição) ou para atingir as condições exigidas pelas operações unitárias subsequentes (CHAVES *et al.*, 2010).

França e Massarani (2010) ressaltam a aplicação do desaguamento como fundamental para a recuperação e a recirculação da água no processo de tratamento de minérios, aplicando os conceitos de sustentabilidade na mineração.

Para as operações de desaguamento, o mercado oferece diversos equipamentos. No entanto, Chaves *et al.* (2010) informam que os mais utilizados na mineração são os espessadores e os filtros a vácuo.

Os espessadores são basicamente tanques cilíndrico-cônicos de aço ou concreto, equipados com braços raspadores para direcionar o material sedimentado até o ponto de remoção. A remoção das partículas sólidas da corrente líquida ocorre pela ação do campo gravitacional, o que confere ao processo baixo custo e simplicidade operacional (FRANÇA e MASSARANI, 2010). Os espessadores, em geral, são projetados para receber polpas com concentração de sólidos entre 5 e 10% e adensá-las grosseiramente entre 50 e 75% de sólidos (CHAVES *et al.*, 2010).

Os filtros a vácuo operam sob o princípio da diferença de pressão entre o tanque de polpa e a superfície do meio filtrante formada pelo sistema de vácuo, possibilitando a passagem do líquido através do meio filtrante, enquanto que os sólidos são retidos no meio filtrante, produzindo tortas secas com espessura inferior a 1 cm (FRANÇA e MASSARANI, 2010). Segundo Chaves *et al.* (2010), o processo de desaguamento dos filtros a vácuo permite produzir tortas com concentração superior a 87% de sólidos em operação contínua sob pressão inferior a 0,8 atm.

#### **4.1.2.5- Concentrado**

Os concentrados apresentam valor econômico agregado e, segundo Jesus (2009), são classificados em granulados e finos, sendo os granulados aqueles com granulometria acima de 6,3 mm, enquanto que os finos são subdivididos em *sinterfeed* (0,15 mm – 6,3 mm) e *pellet feed* (< 0,15 mm). Os produtos granulados são utilizados diretamente nos altos fornos. Já os finos passam por processos de aglomeração (sinterização e pelotização), para posteriormente serem adicionados nos fornos.

#### **4.1.2.6- Rejeito**

Os rejeitos gerados no processo de tratamento do minério não apresentam valor econômico agregado. Entretanto, às vezes, os rejeitos apresentam um teor considerável do mineral de interesse. Isto acontece por dois motivos: não há tecnologia economicamente viável ou ocorre a ineficiência no processo de beneficiamento, caracterizando baixa recuperação (WOLFF, 2009).

A baixa recuperação no processo, além de significar perdas financeiras, aumenta o volume de rejeito a ser disposto no meio ambiente. Sendo assim, quanto maior a eficiência no processo de beneficiamento, menor é o volume de rejeito, aumentando, conseqüentemente, a vida útil da área de disposição e minimizando os impactos ambientais da atividade mineral (WOLFF, 2009).

Tratando-se desta ineficiência, Li *et al.*(2010) desenvolveram uma metodologia inovadora para recuperação do ferro contido nos rejeitos de minério de ferro utilizando processo de calcinação seguido por separação magnética. O processo de calcinação proporcionou um grau de concentração magnética de 61,3% de ferro, permitindo a obtenção de uma taxa de recuperação de 88,2% de minerais de ferro por separação magnética. Segundo Li *et al.* (2010), os resultados obtidos demonstraram que a metodologia aplicada é viável tecnicamente.

Pal *et al.* (2010), por meio de tratamento químico do rejeito de minério de ferro e separação eletrolítica, obtiveram a recuperação de até 65% de minerais de ferro. Segundo Pal *et al.* (2010), o método aplicado torna-se atraente pelo baixo custo de operação e pela alta pureza do produto recuperado, a qual permite sua aplicação direta na siderurgia.

Rocha e Peres (2009), através da concentração por flotação catiônica reversa, desenvolveram experimento para a recuperação do ferro contido no rejeito de minério de ferro. Para o experimento, inicialmente a amostra foi submetida à deslamagem em um conjunto de ciclonagem. Em seguida, dosagens de coletor e depressor foram aplicadas para a flotação. No experimento obteve-se a recuperação de 60 e 80% da massa metálica, demonstrando eficiência no processo

adotado. Segundo Rocha e Peres (2009), a flotação da lama de rejeito de minério de ferro é uma alternativa econômica para o aumento da eficiência da planta de beneficiamento de minério de ferro.

#### **4.1.3- Características dos rejeitos de mineração de ferro**

As variações nas características dos rejeitos de minério de ferro, tais como: alterações nas características geotécnicas, mineralógicas, volumes produzidos, granulometria, variação de densidade, ângulo das arestas e arredondamento dos grãos, estão diretamente relacionadas às condições de operação da planta de beneficiamento, ao tipo de minério e a variabilidade mineral nas frentes de lavra (SILVA, 2010; PEREIRA, 2005). Segundo Araujo (2006), o rejeito é caracterizado pela presença bem definida de uma fração líquida e outra sólida, sendo essa, variando entre 30 e 50% em peso.

Pesquisando-se a classificação granulométrica das partículas de rejeito de minério de ferro, obteve-se uma diversidade de classificações. Na Tabela 1 são apresentadas as classificações granulométricas segundo diferentes autores.

Tabela 1 - Classificações granulométricas para rejeitos de minério de ferro

Granulometria	CLASSIFICAÇÕES GRANULOMÉTRICAS			
	SOMASUNDARN (1980)	PEREIRA (2005)	LIMA (2007)	WOLFF (2009)
Grossa	Tamanho médio > 1 mm	> 0,074 mm	> 0,5 mm	> 0,050 mm
Intermediária	x	X	0,1 - 0,5 mm	X
Fina	Partículas que não são facilmente separáveis por processo físicos de concentração e cujo tamanho médio está compreendido entre 0,010 – 0,100 mm	< 0,074 mm	0,020 – 0,1 mm	< 0,050 mm
Muito Fina	x	X	0,005 – 0,020 mm	X
Ultrafina	Partículas que não são facilmente separadas por processos convencionais de concentração, inclusive a flotação, e cujo tamanho médio desta compreendido entre 0,001 – 0,010 mm	X	0,001 – 0,005 mm	< 0,010 mm
Colóide	Tamanho médio < 0,001 mm	X	0,0002 – 0,001 mm	X
Super Colóide	x	X	< 0,0002 mm	X
Lama	Colóides + Ultrafinos	< 0,074 mm	X	< 0,010 mm

Fonte: (LIMA, 2007, *apud* WOLFF 2009; SOMASUNDARN, 1980, *apud* WOLFF 2009; WOLFF, 2009; PEREIRA, 2005).

Analisando as diferentes classificações granulométricas apresentadas na Tabela 1, observa-se que Pereira (2005), Lima (2007) e Wolff (2009) classificaram as partículas segundo o tamanho, diferente de Somasundarn (1980) que classificou as partículas com base em seu tamanho e comportamento em meio aquoso. Dos quatro autores, Lima (2007) apresenta o maior número de faixas granulométricas (sete) e Pereira (2005) apresenta o menor (três).

Entretanto, rotineiramente, na indústria de mineração, normalmente utiliza-se a classificação conforme apresentada por Wolff (2009): rejeitos grossos ou granulares (> 0,05 mm); rejeitos finos (< 0,05 mm) e lamas ou rejeitos ultrafinos (< 0,01 mm).

Para Pereira (2005), em função da classificação granulométrica, os rejeitos podem ser classificados como finos ou grossos, sendo que tanto um quanto o outro apresentam características granulares. Pereira (2005) também afirma que o rejeito fino apresenta elevada compressibilidade no processo de adensamento, sendo esta

uma característica geotécnica de destaque. Fernandes (2005) *apud* Silva (2010) afirma que os rejeitos granulares apresentam baixa compressibilidade devido a sua alta permeabilidade, possuindo baixa ou nula coesão e alta densidade devido às partículas de ferro herdadas da rocha matriz.

Já Presotti (2002) destaca que, apesar dos rejeitos granulares apresentarem comportamento e característica de areia fina a média, os mesmos não podem ser tratados como tal, pois a forma e o tipo de processo de beneficiamento do minério influenciam nas características mineralógicas, fisicoquímicas e geotécnicas, atribuindo características específicas para o rejeito.

#### **4.1.4- Disposição dos rejeitos da mineração de ferro**

No passado grandes volumes de rejeitos foram descartados nos leitos dos córregos e rios, gerando grandes impactos ambientais. Na evolução da mineração iniciou-se o descarte em sistemas de contenções sem qualquer controle. Após os registros de diversas rupturas de contenções, a legislação ambiental tornou-se mais restritiva, fazendo com que os empreendimentos se adequassem (PEREIRA, 2005).

Atualmente, os rejeitos de minério de ferro são transportados por tubulações, denominadas rejeitodutos, e dispostos sob a forma de polpa nas proximidades ou mesmo dentro do complexo industrial, reduzindo substancialmente o custo de transporte. Todavia, podem ainda ser dispostos após passarem por processos de espessamento, constituindo o rejeito na forma sólida. Neste caso, o transporte pode ser realizado através de equipamentos mecânicos, tipo caminhões e correias transportadoras. Entretanto, esse processo não é comumente utilizado devido ao alto custo para o desaguamento e transporte (PEREIRA, 2005; FERREIRA, 2007 *apud* SILVA, 2010).

As disposições dos rejeitos adotadas pelas mineradoras são basicamente: o preenchimento de cavas desativadas, as pilhas e as barragens de contenção (PEREIRA, 2005).

A disposição de rejeitos em cavas desativadas geralmente é realizada concomitante ao lançamento de estéril, promovendo a recuperação da área impactada (PEREIRA, 2005). Entretanto, para Pereira (2005), as formas de disposição de rejeito mais utilizadas são em pilhas e barragens de contenção.

Para a disposição em pilhas, geralmente os rejeitos são submetidos à secagem prévia. Após a secagem, os mesmos são empilhados utilizando equipamentos específicos para essa finalidade. Dessa forma, para que não ocorra problemas de acúmulo de água é essencial o dimensionamento de um sistema eficiente de drenagem (PEREIRA, 2005). A Figura 2 ilustra a concepção de fluxo gravitacional em uma pilha de rejeitos.



Figura 2- Concepção de fluxo gravitacional em uma pilha de rejeitos

Fonte: Pereira, 2005

Já o sistema de barragens permite a disposição direta de rejeitos na forma de polpa, dispensando a etapa de secagem prévia. Este sistema de contenção é executado a partir de um dique de partida de terra compactada ou de enrocamento de grandes blocos de rocha. O seu alteamento ocorre na maioria das vezes através da técnica de aterro hidráulico, utilizando o próprio rejeito como material de construção, sendo este considerado atrativo do ponto de vista econômico pela redução dos custos de utilização e transporte de outros materiais de construção, bem como executivo e operacional (ARAUJO, 2006; PEREIRA, 2005).

Apesar dos atrativos apresentados a sua utilização como material de alteamento da barragem requer muito cuidado nas variáveis geotécnicas. Sendo assim, aspectos relativos à distribuição granulométrica da fração sólida, à mineralogia, à massa específica *in situ* associada com características de consolidação e deformação, à

massa específica dos grãos e mudança do índice de vazios com o tempo, à resistência ao cisalhamento drenado e não drenado, susceptibilidade à liquefação, permeabilidade, à concentração e velocidade de transporte e outras mais, devem ser contempladas no projeto (PEREIRA, 2005; DORMAN *et al.*, 1996 *apud* ARAUJO, 2006).

#### **4.1.5- Aplicação do rejeito na construção civil**

A busca por aplicações úteis aos rejeitos oriundos da mineração tem sido constante pelas mineradoras, pelos ambientalistas, órgãos de controle e por instituições de pesquisas interessadas pela produção sustentável (PEREIRA, 2005).

A utilização do rejeito de minério de ferro como matéria prima, certamente apresentam vantagens ambientais e econômicas. As suas vantagens estão diretamente relacionadas à minimização dos impactos ambientais, diminuindo as áreas inundadas de rejeitos em pilhas ou barragens de contenção e minimizando a utilização dos recursos naturais não renováveis, como por exemplo, a areia e a brita.

Visando a fomentação da busca por aplicações úteis para os rejeitos de minério de ferro, a revisão bibliográfica foi realizada com foco em aplicações na construção civil, sendo: na construção de barragens de rejeito; pavimentação; e outras aplicações.

##### **4.1.5.1- Construção de barragens de rejeito**

As barragens são obras destinadas às contenções de resíduos, efluentes e líquidos, sendo amplamente utilizadas para a contenção de rejeitos da mineração. Como citado anteriormente, as obras de barragens de contenção de rejeitos iniciam-se a partir de um dique de partida de terra compactada ou enrocamento de rochas. Seu alteamento utilizando o próprio rejeito por etapas apresenta vantagens de baixo custo quando comparadas às barragens convencionais, que são construídas em

uma única etapa usando materiais de empréstimos e com elevado custo (PEREIRA, 2005; PRESOTTI, 2002).

De acordo com Presotti (2002) o alteamento das barragens pode assumir muitas configurações, contendo diferentes vantagens e desvantagens. Utilizando o rejeito como material para o alteamento, Presotti (2002) e Pereira (2005) apresentam três métodos construtivos, conforme a Figura 3:

- Método de Montante;
- Método de Jusante;
- Método de Linha de Centro.

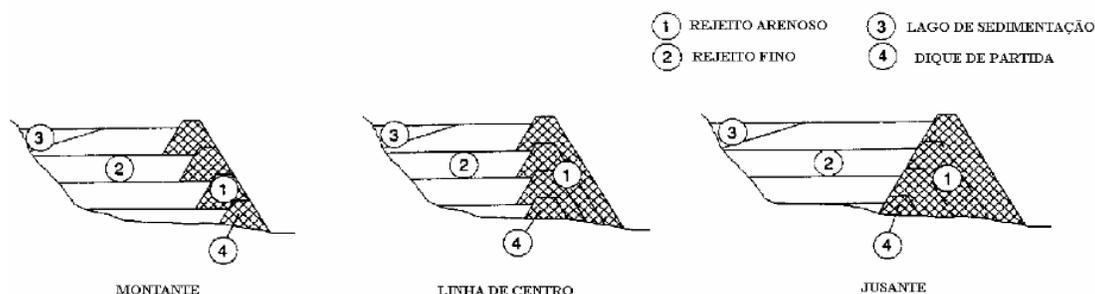


Figura 3- Métodos de disposição de rejeitos

Fonte: Presotti, 2002.

### Método de Montante

O método de montante é o mais antigo e econômico método de construção de barragens. O rejeito é lançado por canhões ou hidrociclones à montante da linha de centro do dique de partida, formando, assim, a praia de deposição que se tornará a fundação e, eventualmente, material de construção para o próximo alteamento (PRESOTTI, 2002).

Segundo Chaves (2011), este é também o método menos seguro, pois a linha central da crista do maciço desloca-se progressivamente para montante, realizando alteamento sobre rejeitos não consolidados, sendo esses materiais de baixa

resistência ao cisalhamento. Por isto, este método é limitado a barragens de 30 a 40 m de altura, evitando a ocorrência de ruptura por cisalhamento. Além disso, existem os problemas de instabilidade e de *piping* por aumento do nível d' água dentro da barragem (PRESOTTI, 2002).

Devido a essas desvantagens, Presotti (2002) não recomenda a utilização deste método. Mas, por tratar-se do método mais econômico, é prudente que se realizem investigações mais detalhadas para avaliar as propriedades do rejeito e as características do processo de deposição de forma a tornar o método de montante mais seguro e viável.

### Método de Jusante

Chaves (2011) afirma que este método é o mais seguro devido as camadas sucessivas de alteamento não ocorrerem sobre o rejeito previamente depositado. Além disso, este método apresenta, como outras vantagens, a possibilidade de impermeabilizar a face interna da barragem, o controle de lançamento e compactação do rejeito.

Para aplicação do próprio rejeito deve-se utilizar ciclones ou outro método de separação, para garantir que somente a fração grossa seja utilizada no corpo da barragem. Como a quantidade de material necessária é muito grande, eventualmente poderá ser necessário material adicional, tornando o método mais caro (PRESOTTI, 2002; CHAVES, 2011).

### Método de Linha de Centro

O método da linha de centro é o intermediário aos outros métodos apresentados, tanto no custo quanto na segurança. A disposição do material de construção é feita hidraulicamente na face de montante do dique e mecanicamente na face de jusante. A diferença entre eles é que a crista da barragem não se move para jusante e nem para montante, mas sim verticalmente (PRESOTTI, 2002; CHAVES, 2011).

A maior vantagem deste método em relação ao de jusante é a necessidade de um menor volume de material para construção do corpo da barragem (PRESOTTI, 2002).

#### **4.1.5.2- Pavimentação**

Analisando o tema verifica-se que há uma carência de pesquisas e trabalhos publicados no Brasil que abordam o uso de rejeito de minério de ferro em pavimentação (SILVA, 2010).

Saraiva (2006) *apud* Silva (2010) aplicou rejeito de minério de ferro misturado a solos argilosos, como materiais alternativos da camada de base, combinando-se com geossintéticos, de acordo com o trecho rodoviário experimental na cidade de Itabira, Minas Gerais. O trecho foi monitorado através de extensômetros elétrico-resistivos e sensores de temperatura e umidade para que os dados coletados, correspondentes as solicitações dinâmicas experimentadas pelo pavimento, fossem comparados diretamente com as deformações medidas no local. Os resultados demonstraram que é tecnicamente viável a utilização do rejeito de minério de ferro na composição de misturas para pavimentos.

Já Fernandes (2005) *apud* Silva (2010), estudou o comportamento mecânico das misturas contendo rejeito de minério de ferro associados a geossintéticos na construção de um trecho experimental de ferrovia instrumentado com sensores elétricos, para medições e análises das deformações verticais e horizontais sofridas pelas camadas estruturais do pavimento, permitindo a comparação entre a mistura contendo rejeito da mistura contendo materiais tradicionais. Os resultados obtidos demonstraram que o rejeito de minério de ferro tenderam a apresentar boa capacidade de suporte, valores elevados de densidade e de ISC (Índice de Suporte Califórnia), baixa expansão e elevados módulos de resiliência, propriedades estas fortemente afetadas pela presença do ferro contido no rejeito. Entretanto, o autor da pesquisa recomenda que sejam executados dispositivos de drenagem adequados para evitar a grande variação do teor de umidade do material de subleito e sublastro ao longo do tempo.

Na busca por estudos e publicações de utilização do rejeito de minério de ferro na produção de peças de concreto para pavimentação foi encontrada apenas uma fonte de citação, limitando a revisão bibliográfica e justificando a necessidade de estudos nessa área.

Em seu trabalho, Costa (2009) apresenta duas experiências práticas da utilização do rejeito de minério de ferro como agregado miúdo na produção de bloquetes de concreto. A primeira experiência descrita foi realizada no município de Brumadinho, Minas Gerais. Nesta experiência foram produzidos bloquetes utilizando rejeitos de *sinter feed*, que por falta de controle tecnológico, redundou na produção de peças com resistência média a compressão igual 8,3 MPa e índice de absorção de água médio igual 7,1%, concluído baixa qualidade comparado com os limites estabelecidos pela NBR 9781 (ABNT, 2013).

A segunda experiência apresentada é a criação do Pavimento Ecológico – o Pavieco, que utilizando o rejeito desassoriado do Córrego da Alegria, localizado no município de São Sebastião das Águas Claras (Macacos), Minas Gerais. Diferente da primeira experiência, o Pavieco teve controle tecnológico e ajustes de produção, produzindo peças de bom aspecto e com satisfatória resistência, embora não se conheça o registro destes resultados (COSTA, 2009).

Motivado pelas experiências apresentadas, Costa (2009) desenvolveu pesquisa para produção de peças de concreto para pavimentação utilizando como agregado miúdo o rejeito de minério de ferro de *sinter feed*. Para o desenvolvimento da pesquisa foram confeccionados corpos de prova contendo diferentes proporções de rejeito em substituição da areia. Os corpos de prova moldados foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão, desgastes à abrasão e absorção de água. Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão apresentaram-se bem próximos ao de produção convencional, destacando-se o corpo de prova com 75% de rejeito, o qual atingiu uma resistência aos 28 dias de 34 MPa. Nos ensaios de desgastes à abrasão e absorção de água as amostras contendo rejeito apresentaram melhor desempenho do que as amostras convencionais. Com isso, Costa (2009) conclui que a aplicação do rejeito de minério de ferro *sinter feed* na produção de pavimentos intertravados é tecnicamente viável.

#### 4.1.5.3- Outras aplicações

Bertocini e Aristimunho (2012) avaliaram a viabilidade técnica da lama de lavagem do minério de ferro (rejeito) na forma de pó em argamassas de cimento Portland. No experimento realizado foram moldados e ensaiados corpos de prova com variadas proporções, classificadas em quatro grupos, sendo: referência, adição, substituição da areia e substituição do cimento, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2– Resistência à compressão e massa específica real

Composição		Traço (cimento : areia : rejeito)	Relação água/cimento	Resistência a compressão (MPa)			Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
				7 dias	28 dias	90 dias	90 dias
Referência	-	1 : 3 : 0	0,60	16,14	24,55	24,36	2,50
Adição	4%	1 : 3 : 0,04	0,60	12,52	23,59	21,82	-
	6%	1 : 3 : 0,06	0,60	18,75	30,69	30,00	-
	8%	1 : 3 : 0,08	0,60	17,45	26,57	34,56	-
	20%	1 : 3 : 0,20	0,60	12,03	21,75	20,60	-
Substituição de Areia	20%	1 : 2,4 : 0,6	0,60	19,14	20,59	30,23	2,60
	60%	1 : 1,2 : 1,8	0,65	21,84	30,48	32,65	3,10
	100%	1 : 0 : 3	0,76	14,82	30,98	36,98	3,55
Substituição de Cimento	10%	1 : 3,3 : 0,1	0,60	11,56	15,66	17,15	-
	20%	1 : 3,75 : 0,25	0,60	10,10	8,75	16,51	-
	30%	1 : 4,3 : 0,43	0,60	9,46	8,79	11,16	-

Fonte: Bertocini e Aristimunho, 2012.

Analisando os resultados da Tabela 2, Bertocini e Aristimunho (2012) ressaltam que, dentre as adições de rejeito de minério de ferro, a adição de 8% apresentou melhor comportamento mecânico, apresentando ganho de 42% da resistência a compressão aos 90 dias em relação ao traço de referência. Nas substituições de areia, a substituição de 20% se destacou entre as demais por apresentar um resultado superior ao de referência, mantendo uma massa específica próxima ao de referência. Os traços com 60 e 100% de substituição de areia apresentaram alta resistência e elevada massa específica viabilizando sua aplicação somente em pisos e pavimentos.

Na China, Yi *et al.*(2009) desenvolveram pesquisa para utilização de rejeitos de minério de ferro como uma das matérias primas para a produção de cimento, sendo

que para a transformação das propriedades cristalinas do rejeito em cimentícias foi aplicada a técnica de calcinação. Após a modificação das propriedades do rejeito, este foi misturado com escória de alto forno, clínquer e gesso em proporções de 30, 40 e 50% e, em seguida, foram preparadas argamassa e submetidas ao ensaio de resistência à compressão. Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão nas idades de 3, 28 e 90 dias.

Tabela 3– Resistência à compressão

Temperatura de Calcinação °C	Composição de Rejeito %	Resistência à Compressão MPa		
		3 dias	28 dias	90 dias
100	30	24,1	39,8	43,5
100	40	23,2	32,1	36,4
100	50	16,8	22,4	28,5
500	30	25,5	41,2	45,6
500	40	24,4	33,1	38,9
500	50	18,5	26,4	29,8
700	30	26,2	44,3	49,8
700	40	25,0	35,1	41,3
700	50	21,0	30,7	34,6
900	30	28,3	48,5	54,3
900	40	26,1	39,3	47,4
900	50	23,7	32,4	39,2

Fonte: Yi *et al.*, 2009

Conforme análise de Yi *et al.*(2009), dos resultados apresentados na Tabela 3 destaca-se a resistência de 48,5 MPa, a qual foi obtida aos 28 dias pela composição de 30% de rejeito à temperatura de 900 °C. Segundo Yi *et al.* (2009), o resultado obtido satisfaz as exigências de resistência à compressão da norma chinesa e demonstra que é viável tecnicamente a utilização do rejeito de minério de ferro como material cimentício.

Nociti (2011) avaliou em sua pesquisa a viabilidade técnica da utilização de dois tipos de rejeitos (arenoso e lama) da mineração de ferro na fabricação de blocos cerâmicos. Para a determinação das proporções de rejeitos arenoso e lama a serem utilizadas foram realizados ensaios de limite de liquidez e de plasticidade. Segundo os ensaios foram definidas as proporções de 7,5% de rejeito arenoso e 5% de lama.

Com a definição das quantidades a serem compostas as amostras foram conformadas em prensagem uniaxial e sinterizadas à 900 °C. Em seguida as amostras foram submetidas aos ensaios de contração, perda de massa, análise térmica, porosidade aparente, rugosidade e resistência mecânica. Por meio dos resultados obtidos, Nociti (2011) conclui que as quantidades de rejeitos utilizadas não proporcionaram alterações relevantes no desempenho dos blocos. Os blocos produzidos com rejeitos atenderam os requisitos normativos vigentes, tornando-se viável tecnicamente a sua aplicação.

Souza *et al.* (2008) avaliando as propriedades físicas e mecânicas de cerâmica contendo rejeito de minério de ferro, constataram que não houve alteração na retração linear da cerâmica nas temperaturas de 700, 900 e 1100 °C. A cerâmica contendo rejeito na proporção de 5%, em peso, apresentou um melhor desempenho nos ensaios de absorção de água e resistência mecânica, em comparação com a cerâmica convencional. Na proporção de 10% diminui a absorção e a resistência, entretanto, manteve-se um desempenho satisfatório. Em proporções acima de 10% os resultados foram insatisfatórios. Segundo Souza *et al.* (2008), os resultados apresentados na proporção de até 10% de rejeito incorporado na cerâmica foram satisfatórios, uma vez que o resíduo atuou como material de preenchimento, reduzindo a porosidade e proporcionando maior desempenho às peças.

Huang *et al.* (2013) avaliaram a utilização do rejeito de minério de ferro na produção de compósitos cimentícios do tipo *Engineered Cementitious Composites* (ECC). O ECC trata-se de um compósito cimentício reforçado com fibras e foi desenvolvido para suportar os esforços de tração, os quais os concretos convencionais apresentam baixo desempenho. Dentre outros, na composição do ECC são aplicadas micro-sílicas que pelo o seu alto custo e disponibilidade limitada tornam-se barreiras para aplicação generalizada do ECC. Para superar estas barreiras, Huang *et al.* (2013) utilizaram o rejeito de minério de ferro em substituição da micro-sílica. Dentre os diferentes tipos de granulometria de rejeito aplicadas no experimento destacaram-se o rejeito fino e o rejeito com diâmetro <425 µm, os quais permitiram uma boa dispersão das fibras. As propriedades mecânicas foram similares às obtidas na mistura padrão de ECC com micro-sílicas.

## 4.2- Adições minerais

Adições minerais consistem na incorporação de minerais que podem ocorrer tanto na fase de produção do cimento, substituindo parcialmente o clínquer, quanto na confecção do concreto. Quando aplicada no concreto, tem por finalidade melhorar as propriedades físicos-químicas, promovendo a redução da porosidade, diminuição do calor de hidratação, bem como a fissuração térmica (DAL MOLIN, 2005).

Atualmente, utiliza-se como adições minerais resíduos gerados por diferentes setores industriais, promovendo a destinação ambientalmente correta destes e a preservação dos recursos naturais não renováveis, pela diminuição da matéria-prima extraída, tornando essa técnica altamente sustentável (DAL MOLIN, 2005). Segundo Dal Molin (2005), as adições minerais são classificadas da seguinte forma:

- Material pozolânico;
- Material cimentante;
- Fíler.

A NBR 12653 (ABNT, 1992) define material pozolânico como sendo:

*“... um material silicoso ou sílico-aluminoso com nenhuma ou pouca propriedade aglomerante (cimentícia), mas que quando finamente moído e na presença de água, reage quimicamente em temperatura ambiente com o hidróxido de cálcio, formando compostos com propriedades aglomerantes.”*

Os materiais pozolânicos são diferenciados por classe, sendo classificados em N, C e E. A classe N é formada por pozolânas naturais e artificiais, a C por cinza volante produzida pela queima do carvão mineral e a E por qualquer outra pozolana que não enquadra nas classes N e C, da NBR 12653 (ABNT, 1992).

O material cimentante é aquele capaz de formar C-S-H sem a presença do hidróxido de cálcio, o qual se encontra presente no cimento Portland, mas, considerando que

os materiais cimentantes apresentam uma auto hidratação lenta e produtos aglomerantes insuficientes para fins estruturais, torna-se necessária a sua aplicação como adição ou substituição em cimento Portland, para que possa acelerar a hidratação na presença do hidróxido de cálcio e da gipsita, tendo como exemplo a escoria granulada de alto-forno (DAL MOLIN, 2005).

O filer é um material inerte finamente dividido, com diâmetro médio próximo ao do cimento, a sua adição apresenta somente interferências físicas, promovendo o empacotamento granulométrico e pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento (DAL MOLIN, 2005). Além destas vantagens o *filler* quando adicionado ao concreto proporciona uma melhor trabalhabilidade, maior massa específica, menor permeabilidade, exsudação e tendência a fissuração (NEVILLE, 1995).

Segundo Dal Molin (2005), a proporção de mistura de filer ao concreto normalmente não ultrapassa a 15% da massa de cimento, diferente do limite de adição em cimentos Portland compostos, o qual a NBR 11578 (ABNT, 1991) determina como limite 10% de utilização de material carbonático como filer, devendo este ter no mínimo 85% de  $\text{CaCO}_3$ .

### **4.3- Pavimento intertravado**

#### **4.3.1- Considerações iniciais**

Devido à simplicidade no processo construtivo e manutenção os pavimentos intertravados vêm se destacando entre as alternativas de pavimentação. Além disso, entende-se que os pavimentos intertravados colaboram para o desenvolvimento sustentável, visto que estes permitem a permeabilidade das águas pluviais, diminuindo a incidência de alagamentos e favorecendo a recarga dos lençóis d'água, bem como apresentam um maior conforto térmico devido a sua menor absorção da luz solar (HALLACK, 2001).

Do ponto de vista da praticidade os pavimentos intertravados apresentam uma maior facilidade de acesso e manutenção nas redes subterrâneas de água, esgoto,

luz e gás, não exige mão de obra qualificada para a realização de intervenção e permitem a reutilização das peças removidas. Após qualquer intervenção a liberação do tráfego local é imediata (SIMIELE, 2010).

Segundo Simiele (2010) desde o início da utilização da pavimentação com blocos intertravos à registro de utilização de quatro tipos de materiais para produção das peças intertravadas, sendo estes: argila, pedra, madeira e concreto. Dentre os materiais utilizados existem evidências de aplicação de blocos de argilas em revestimentos na Mesopotâmia há 5000 anos, tornando-se este o registro mais antigo de pavimentação com blocos intertravados.

#### **4.3.1.1- Blocos de argila**

Segundo Cruz (2003), os blocos de argila utilizados como revestimento para a pavimentação eram assentados sobre uma camada de betume, de maneira a garantir a sua aderência ao terreno pavimentado. Contudo, a sua durabilidade era relativamente baixa devido ao desgaste excessivo gerado pelo tráfego da época. No entanto, no final do século XIX, com o surgimento dos primeiros fornos que queimavam os blocos em altas temperaturas, ocorreu o aprimoramento da técnica, proporcionando o aumento na resistência mecânica dos blocos. Com o aprimoramento da técnica, esta passou a ser bastante utilizada na Europa e América.

No Brasil, devido a escassez de pedra e abundância de argila na região do Acre, a cidade de Rio Branco vem desde 1940 utilizando os blocos de argila queimada como revestimento na pavimentação de suas ruas. Sendo que, para a fabricação dos blocos adota-se como critério de seleção de material prima o alto índice de resistência à compressão, para que quando preparada e queimada resulte em blocos com satisfatória resistência à compressão e ao desgaste (FUNTAC, 1997). Na Figura 4 apresenta-se pavimento de blocos de argila na cidade de Rio Branco, AC.



Figura 4 - Pavimento de blocos de argila na cidade de Rio Branco – AC  
Fonte: (NASCIMENTO, 2005)

#### **4.3.1.2- Pedras talhadas e emparelhadas manualmente**

Os primeiros modelos de assentamento de pedras talhadas em tipo espinha de peixe ou em fileiras surgiram no século XVIII. Nesta época já havia preocupação em produzir peças com dimensões iguais, de maneira a manter estreitas as juntas de assentamento. A técnica de selamento das juntas com argamassa de cimento ou com uma mistura de asfalto e areia foi implementada no século XX e tinha por finalidade amenizar o barulho gerado durante a ação do tráfego (SIMIELE, 2010).

Este tipo de pavimento no Brasil é denominado de paralelepípedos ou paralelos e pé de moleque. As peças de revestimento do pavimento de paralelepípedos apresentam dimensões próximas de 12 cm de largura, 20 cm de comprimento e 20 cm de altura. Atualmente, este tipo de pavimento é mais aplicado em cidades do interior e rodoviárias das grandes cidades. Para o seu assentamento o local deve ser preparado previamente com uma espessa camada de areia e as peças assentadas devem possuir juntas entre se de até 2 cm. As pedras tipo pé de moleque foram inseridas no Brasil pelos portugueses a partir de 1600, sendo que estas apresentam formatos irregulares e dimensões de até 50 cm e o seu

assentamento ocorre diretamente sobre o terreno natural (CRUZ, 2003). A Figura 5 ilustra o pavimento pé de moleque na cidade de Paraty, Rio de Janeiro.



Figura 5 - Pavimento pé de moleque na cidade de Paraty – RJ  
Fonte: (ARY JÚNIOR, 2007)

#### **4.3.1.3- Blocos de madeira**

Os revestimentos de blocos de madeira eram utilizados no início do século XIX e tinham por finalidade a redução de ruído gerados principalmente por tráfego de carruagens com rodas de ferro. As dimensões dos blocos tinham em média entre 12,5 cm e 25 cm de comprimento e 7,5 cm e 10 cm de largura. Para auxiliar na ancoragem da peças à base do pavimento, estas eram previamente envolvidas por uma camada de mastique betuminoso polvilhada por pequenos grãos de pedra (CRUZ, 2003).

Embora o pavimento revestido de blocos de madeira reduzisse o barulho durante o tráfego, este tornava-se escorregadio quando molhado. Portanto, com o surgimento dos veículos com pneus de borracha, este tipo de pavimento foi abandonado (CRUZ, 2003).

#### **4.3.1.4- Peças pré-moldadas de concreto**

As primeiras peças produzidas com concreto datam do final do século XIX, sendo que os primeiros avanços no desenvolvimento de sua utilização ocorreram na reconstrução da Alemanha e Holanda, após a Segunda Guerra Mundial. Nesta época as peças produzidas imitavam os tijolos e pedras aparelhadas, as quais eram utilizadas e necessitavam ser substituídas. As vantagens de sua utilização eram os custos mais baixos e padrão dimensional (SIMIELE, 2010).

Com o passar do tempo foi desenvolvido novos modelos de peças, iniciando a implementação do conceito de intertravamento e de um melhor controle de espessuras das juntas. Por fim, o desenvolvimento da pavimentação de peças pré-moldadas de concreto permitiu relacionar a escolha da forma geométrica com o desempenho do pavimento, com base no tipo de tráfego a ser submetido (CRUZ, 2003).

Em meados dos anos 1960, além dos países europeus, o pavimento de peças pré-moldadas de concreto já estava comercialmente consolidado nas Américas Central e do Sul e África do Sul. Na década de 70 ocorreu o aumento do uso na Austrália, Japão, Nova Zelândia e Estados Unidos. No final da década de 70 a produção de peças pré-moldadas de concreto já estava presente em todo mundo, sendo utilizadas 200 tipos diferentes de formas e diversos tipos de equipamentos para a fabricação das peças (CRUZ, 2003).

Na década de 70, vários países da América Central passaram a utilizar em rodovias o pavimento intertravado. A Colômbia aderiu a prática a partir da década de 80. Já em 1990, a África do Sul iniciou um programa financiado pelo Banco de Desenvolvimento do Sul da África para pavimentação de rodovias com peças pré-moldadas de concreto (CRUZ, 2003).

No Brasil, segundo Ary Júnior (2007) a utilização de peças pré-moldadas de concreto na pavimentação cresceu em escala exponencial, principalmente, em vias urbanas, portos, pátios industriais e estacionamentos. A Figura 6 evidencia a

utilização do pavimento intertravado no pátio de armazenagem do Complexo Portuário do Pecém, Ceará.



Figura 6 - Pátio de armazenagem do Complexo Portuário do Pecém, Ceará

Fonte: (ARY JÚNIOR, 2007)

#### **4.3.2- Estrutura do pavimento intertravado**

Segundo Simiele (2010), a estrutura do pavimento intertravado é constituída por subleito, sub-base, base e areia de assentamento revestida com peças pré-moldadas de concreto, rejuntadas com areia. Tanto a areia de assentamento, quanto as peças que compõem o revestimento são confinadas lateralmente, por sarjetas ou guias de concreto. A estrutura do pavimento intertravado encontra-se apresentada na Figura 7.

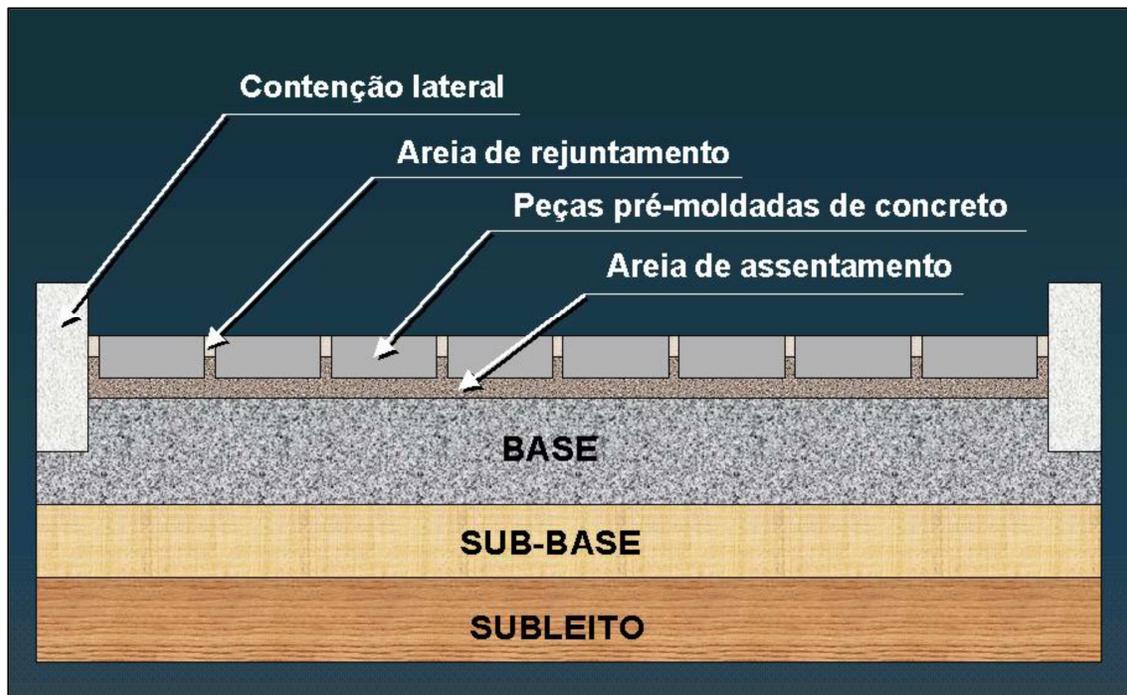


Figura 7- Estrutura típica do pavimento intertravado

Fonte: Hallack, 1998, *apud* Simiele, 2010

Segundo a norma NBR 15953 – Pavimento intertravado com peças de concreto – Execução (ABNT, 2011), o subleito é a fundação do pavimento formado pelo solo local ou de áreas de empréstimo, o qual deve ser executado em conformidade com a norma NBR 12307 – Regularização do subleito (ABNT, 1991).

Conforme a norma NBR 15953 – Pavimento intertravado com peças de concreto – Execução (ABNT, 2011) a sub-base é a camada corretiva do subleito, ou complementar à base, e pode ser formada por cascalhos, misturas compostas por cimento, agregados reciclados ou industriais. Segundo Simiele (2010) a base tem por objetivo proteger o subleito da ação das cargas externas, que conforme Godinho (2009), esta recebe e distribui as tensões da carga sobreposta e transmiti-as em intensidade significativamente menor às camadas subjacentes. Godinho (2009) ressalta que a base pode ser formada por material estabilizado ou granular.

NBR 15953 (ABNT, 2011), a contenção lateral tem por finalidade realizar o intertravamento das peças de concreto e garantindo a estabilidade do pavimento. A instalação da contenção lateral é executada antes da camada de assentamento. A camada de assentamento, em geral, é composta por areia e tem como função receber as peças de concreto e garantir o nivelamento e a distribuição da carga do pavimento.

A última camada é a de revestimento, a qual é composta por peças de concreto e material de rejuntamento. As peças de concreto são dispostas sobre a camada de assentamento, compactadas, rejuntadas com areia fina e novamente compactadas até que se obtenha o intertravamento das peças. Hallack (2001) afirma que após o intertravamento, as peças tornam-se resistentes aos movimentos de deslocamento horizontal, vertical, e/ou de rotação. Ao fim, as peças de concreto formam a superfície do pavimento e recebem diretamente a carga de rolamento do tráfego de veículos e pedestres, desempenhando uma importante função estrutural (SIMIELE, 2010).

Cruz (2003), ressalta que o revestimento é capaz de proteger a camada de base do desgaste por abrasão provocado pelas cargas e tensões aplicadas pelo tráfego, bem como reduzir o nível de umidade da camada de base, aumentando a estabilidade do material.

Outro material comum de ser utilizado na formação da estrutura do pavimento intertravado é a membrana geotêxtil, que tem por finalidade proteger as camadas inferiores da ação de arraste de partículas finas provocada pela infiltração de água ou mesmo pelo bombeamento exercido pela ação contínua do tráfego ou ainda pela fuga de material em áreas próximas às contenções laterais, tais como, meio fio, drenos ou caixas de passagem (CRUZ, 2003).

#### **4.3.2.1- Camada de peças pré-moldadas de concreto**

As peças pré-moldadas de concreto desempenham uma importante função estrutural como superfície de rolamento do pavimento, sendo estas decisivas na durabilidade do pavimento e nas condições de conforto aos usuários (SIMIELE, 2010).

##### Formato das peças pré-moldadas de concreto

Segundo Shackel (1990) as peças segmentadas apresentam um melhor desempenho quanto à distribuição dos esforços, devido ao desenho da peça que proporciona um melhor intertravamento. No entanto, Knapton e Cook (1992) afirmam que o formato das peças pré-moldadas de concreto não influencia significativamente no desempenho e no mecanismo de funcionamento dos pavimentos. Portanto, Simiele (2010) conclui que em relação ao formato das peças a única recomendação é que esta seja capaz de permitir o revestimento do pavimento em combinação bidirecional. Na Figura 8 apresentam-se os formatos típicos de peças pré-moldadas de concreto.

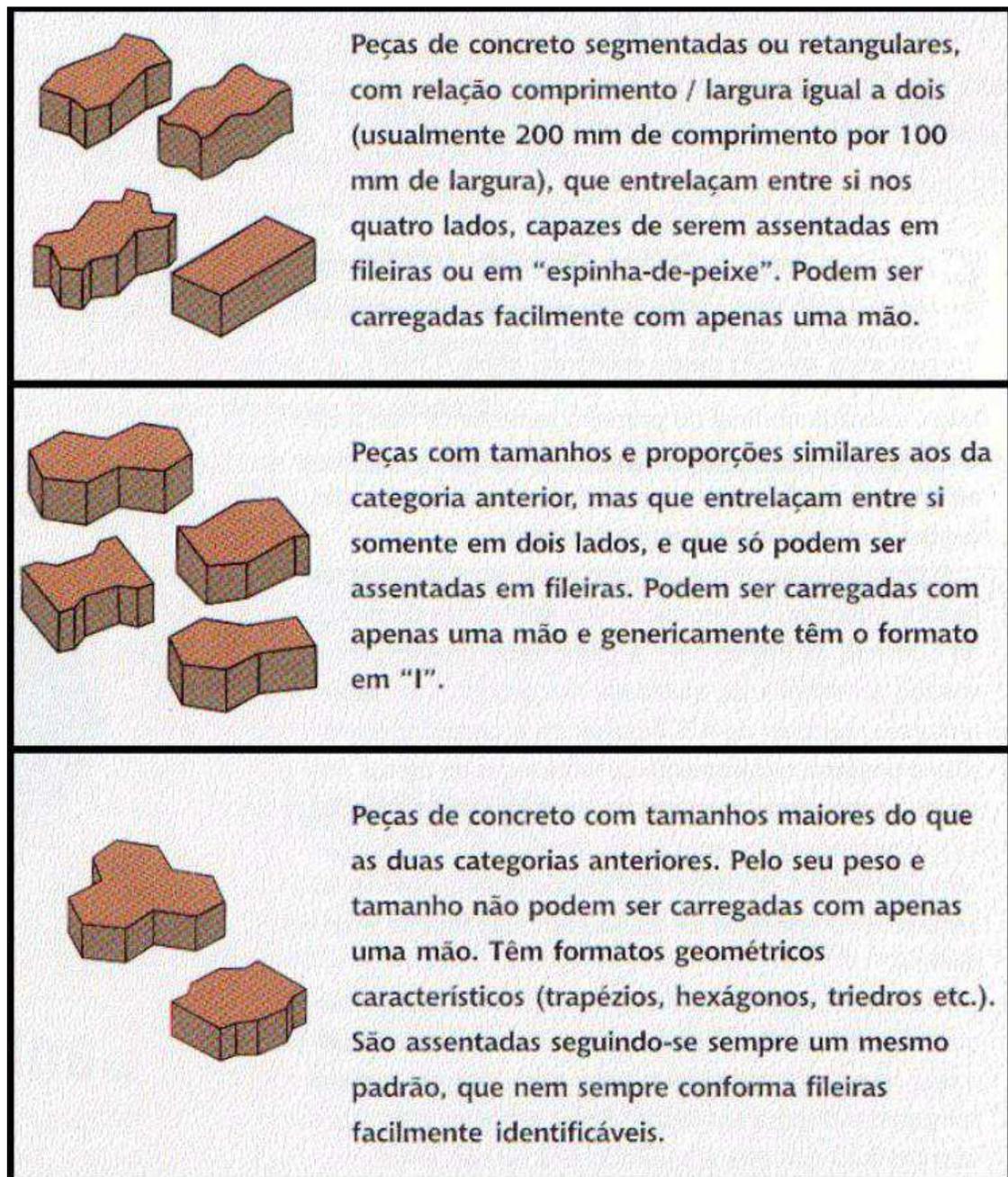


Figura 8 – Formatos típicos de peças pré-moldadas de concreto

Fonte: (HALLACK, 2001).

Com relação aos formatos apresentados na Figura 8, estes são utilizados no intertravamento horizontal. No intertravamento horizontal a peça fica impossibilitada de se movimentar horizontalmente em relação às peças vizinhas e contribui na distribuição dos esforços sob a ação do tráfego (KNAPTON, 1996). Segundo Cruz (2003) o intertravamento horizontal é o mais utilizado no mundo e apresenta como vantagens um sistema de assentamento simplificado e um custo de fabricação menor em relação aos outros.

#### Espessuras das peças pré-moldadas de concreto

Segundo Shackel (1990) o aumento na espessura das peças no intervalo de 6 cm a 10 cm favorece no desempenho mecânico do pavimento. Tal posicionamento é embasado por meio dos resultados obtidos nos ensaios realizados com o Simulador de Veículos Pesados, na África do Sul, os quais demonstraram que as deformações das peças de 8 cm de espessura foram consideravelmente menores do que as de 6 cm e superior as de 10 cm, conforme evidenciado na Figura 9.

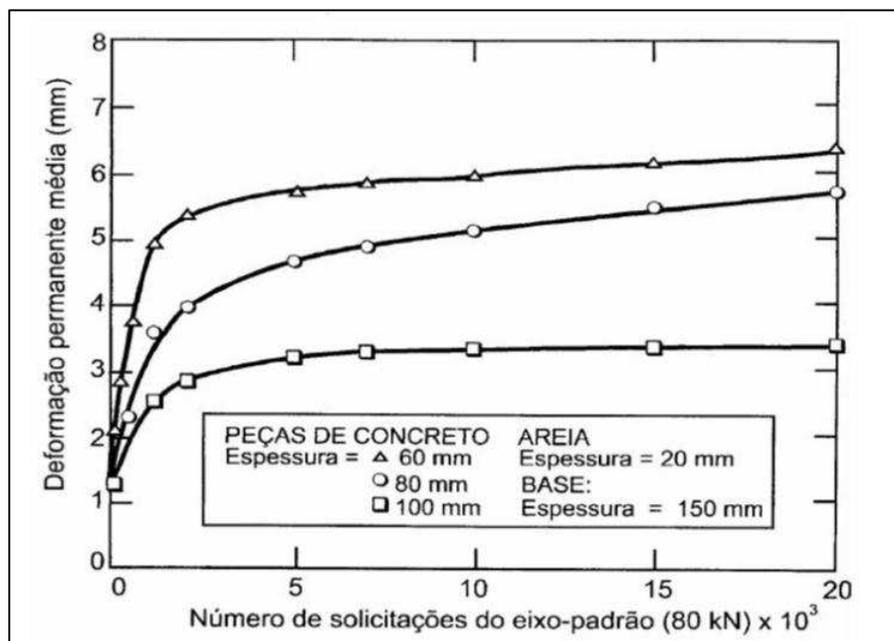


Figura 9 - Efeito da espessura das peças pré-moldadas de concreto no desempenho do pavimento

Fonte: (SHACKEL, 1990)

### Modelos de assentamento das peças pré-moldadas de concreto

O modelo de assentamento apresenta influência direta na aparência estética e no desempenho do pavimento. Segundo Cruz (2003) entre os pesquisadores não há um consenso sobre as interferências na durabilidade do pavimento nos diferentes modelos de assentamento, entretanto, há um consenso de que a durabilidade é influenciada pelo tipo de assentamento.

Para áreas de tráfego veicular, o boletim técnico nº 4 do ICPI (ICPI, 2003), sugere a utilização do modelo de assentamento espinha de peixe, por este apresentar um maior nível de intertravamento e conseqüentemente um melhor desempenho estrutural. Nas Figuras 10 a 12 apresentam-se os modelos de assentamento mais utilizados em pavimentos intertravados.

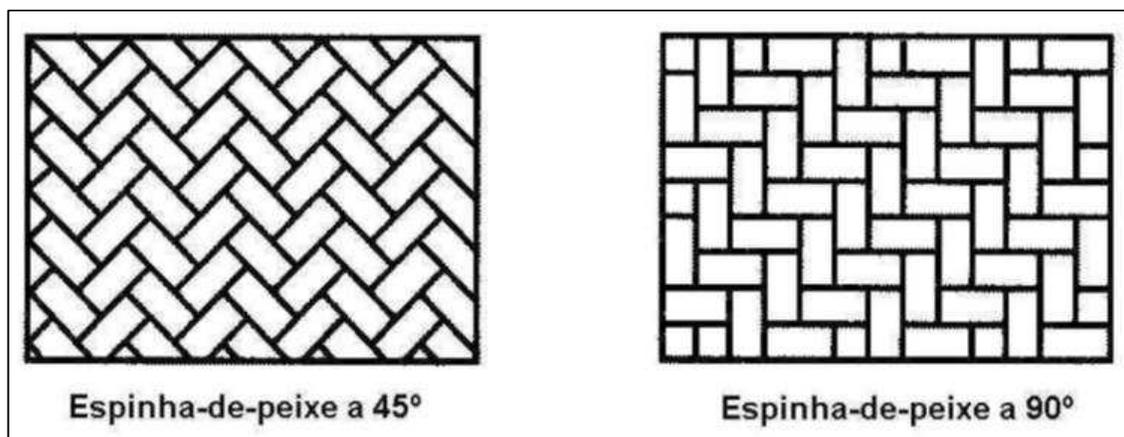


Figura 10 - Modelo de assentamento das PPC tipo espinha de peixe

Fonte: (HALLACK, 2001)

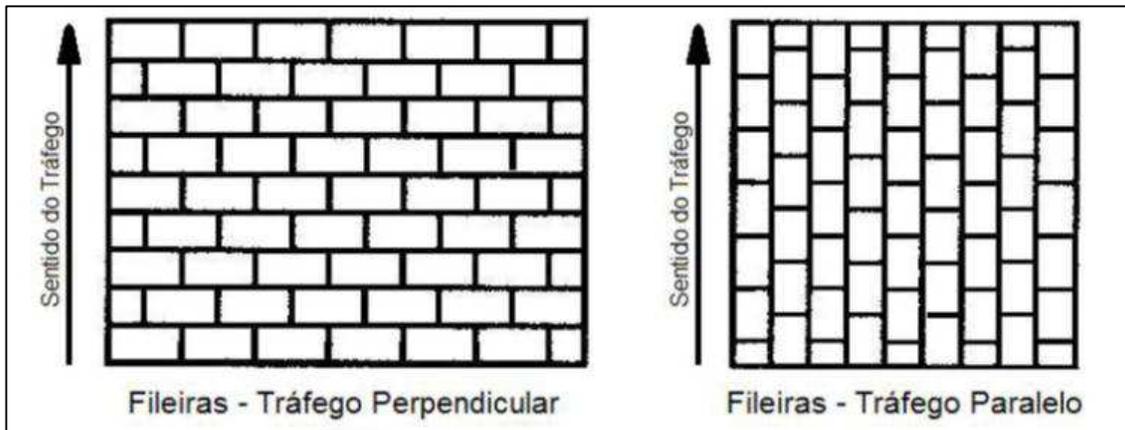


Figura 11 - Modelo de assentamento das PPC tipo fileiras

Fonte: (HALLACK, 2001)

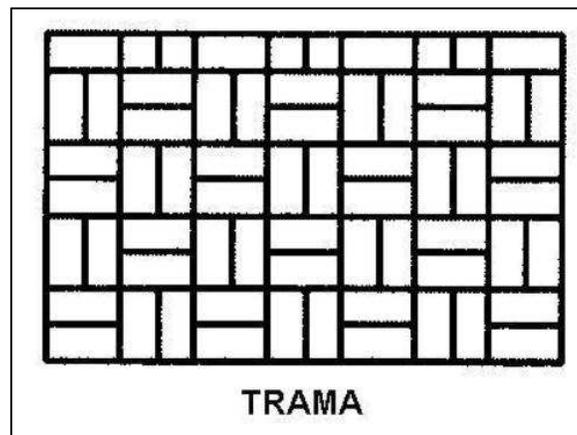


Figura 12 - Modelo de assentamento das PPC tipo trama

Fonte: (HALLACK, 2001)

#### 4.3.3- Produção de Peças Pré-Moldadas de Concreto

A produção de peças pré-moldadas de concreto pode ser realizada por dois métodos, manual ou mecânico. O método manual tem a capacidade de produção limitada pela quantidade disponível de fôrmas e do desempenho da equipe operacional. Neste método, o concreto dosado apresenta uma consistência mais plástica para permitir o preenchimento das fôrmas manualmente, bem como o adensamento em mesa vibratória. A produção manual apresenta como vantagem um excelente aspecto visual na superfície das peças, devido à utilização das fôrmas

e da plasticidade do concreto. No entanto, este método apresenta como desvantagem a impossibilidade de produção de peças com a mesma resistência mecânica (SIMIELE, 2010).

No método mecânico o processo de moldagem e adensamento são realizados em vibro prensas multifuncionais que podem além de produzir peças pré-moldadas de concreto para aplicação em pavimentos intertravados, podem produzir outros artefatos pré-moldados, por exemplo: tijolos, blocos, meio-fios, e etc. Neste método, o concreto é dosado com uma consistência seca, sendo as peças pré-moldadas obtidas por meio de pressão e vibração da vibro prensa proporcionando resistência e durabilidade para as peças. O método mecanizado apresenta como vantagem alta produção e controle das resistências mecânicas, textura e dimensões garantindo a qualidade do produto final (SIMIELE, 2010).

#### **4.3.4- Critérios de aceitação das peças de concreto para pavimentação**

A NBR 9781 – Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio (ABNT, 2013) estabelece os critérios para aceitação de peças de concreto para pavimentação intertravada, por meio de especificação e métodos de ensaio.

As peças de concreto podem ser confeccionadas em diferentes formatos. Segundo NBR 9781 (ABNT, 2013) estes formatos podem ser divididos em quatro tipos: Tipo I, Tipo II, Tipo III e Tipo IV. As peças do Tipo I apresentam relação comprimento/largura igual a dois, formato próximo ao retangular e permitem ser assentadas em fileiras ou em espinha de peixe. As peças do Tipo II apresentam formato único, diferente do retangular e só permite ser assentada em fileiras. Peças do Tipo III apresentam formatos característicos, tais como: triedros, hexágonos, trapézios, e etc. Peças Tipo IV apresentam diferentes formatos e tamanhos, que permitam a sua utilização com um ou mais padrões de utilização. Nas Figuras 13 a 16 apresentam-se exemplos para cada tipo de peça de concreto.

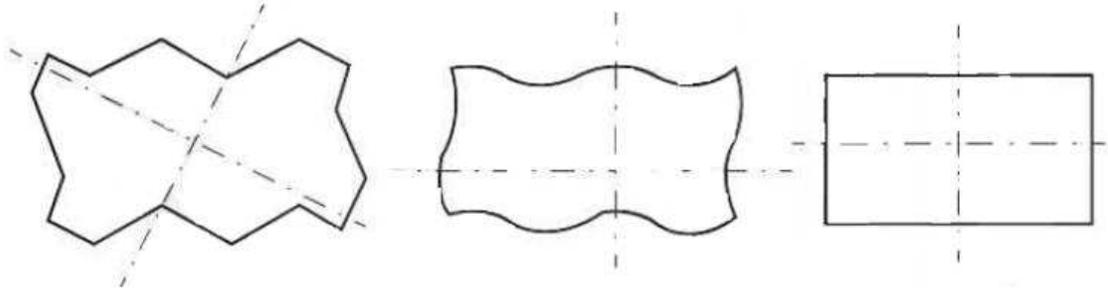


Figura 13- Exemplos de peças de concreto Tipo I

Fonte: NBR 9781 (ABNT, 2013)

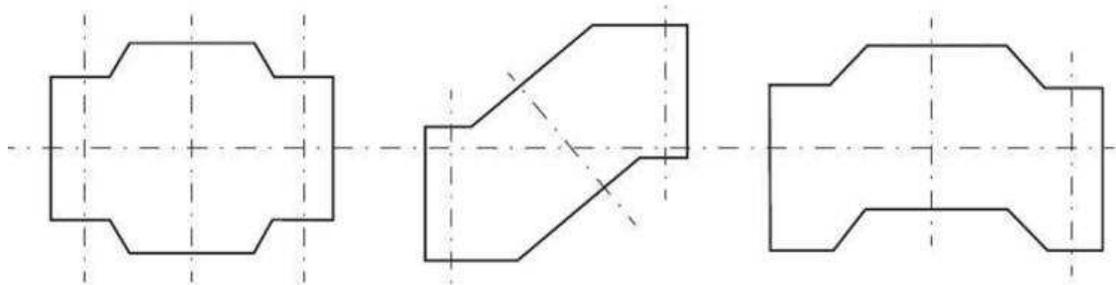


Figura 14- Exemplos de peças de concreto Tipo II

Fonte: NBR 9781 (ABNT, 2013)

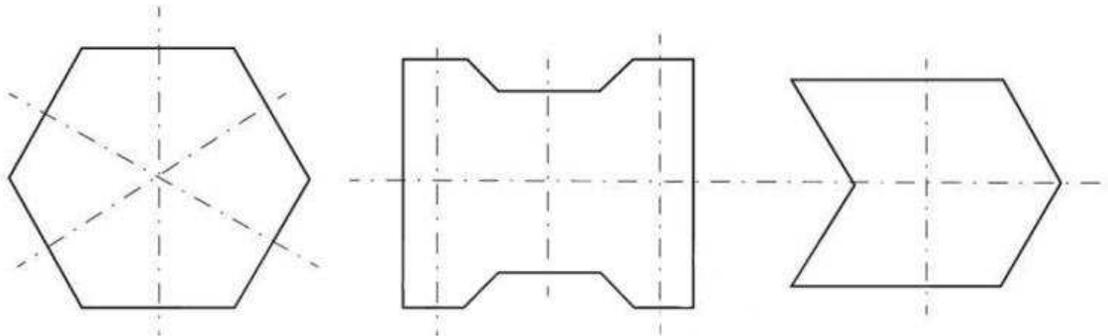


Figura 15- Exemplos de peças de concreto Tipo III

Fonte: NBR 9781 (ABNT, 2013)

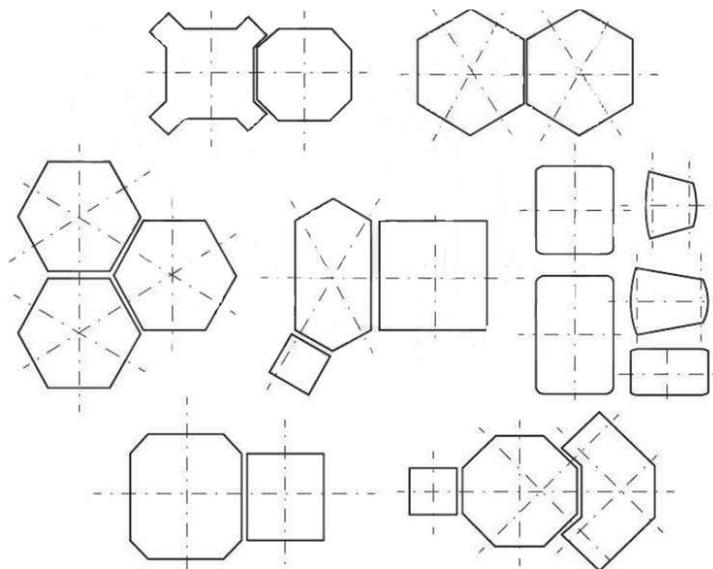


Figura 16- Exemplos de peças de concreto Tipo IV

Fonte: NBR 9781 (ABNT, 2013)

Para os ensaios de aceitação NBR 9781 (ABNT, 2013) determina que seja realizada uma amostragem aleatória das peças constituintes de cada lote de fabricação, conforme especificado na Tabela 4.

Tabela 4- Amostragem para ensaio

<b>Propriedade</b>	<b>Amostra</b>
Inspeção visual	6 <sup>a</sup>
Avaliação dimensional	6 <sup>a</sup>
Absorção de água	3
Resistência à compressão	6
Resistência à abrasão	3 <sup>b</sup>

<sup>a</sup> As peças amostradas podem ser utilizadas também para os ensaios de resistência à compressão ou abrasão

<sup>b</sup> Ensaio facultativo.

Fonte: NBR 9781 (ABNT, 2013)

A inspeção visual tem por objetivo a identificação de peças com defeitos que possam comprometer a estética do pavimento, o assentamento e/ou o desempenho

estrutural. Segundo a norma NBR 9781 (ABNT, 2013), as peças devem apresentar arestas regulares, ângulos retos, aspecto homogêneo e sem defeitos aparentes. Caso durante a inspeção sejam identificadas mais de 5% de peças com defeitos o lote deve ser rejeitado.

Na avaliação dimensional a norma NBR 9781 (ABNT, 2013) determina que a medida nominal das peças deve apresentar comprimento máximo de 250 mm, espessura mínima de 60 mm e a largura deve apresentar medida real mínima de 97 mm. A norma apresenta tolerância de  $\pm 3$  mm no comprimento, largura e espessura. No entanto, para peças destinadas a pavimentação de vias com tráfego de veículos ou áreas de armazenamento a relação comprimento/espessura deve ser  $\leq 4$ .

Segundo a norma NBR 9781 (ABNT, 2013), as amostras submetidas ao ensaio de absorção de água deve apresentar valor médio  $\leq 6\%$ . Porém, o lote será rejeitado caso apresente algum valor individual  $> 7\%$ .

Para a resistência à compressão a norma NBR 9781 (ABNT, 2013) define como parâmetro de aceitação a resistência característica à compressão obtida aos 28 dias, em MPa. Para peças com aplicação em pavimentos destinados ao tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha a resistência mínima aceitável é de 35 MPa. Enquanto, que para pavimentos com solicitações abrasivas e tráfego de veículos especiais o mínimo aceitável é de 50 MPa. Para peças ensaiadas em idade inferior aos 28 dias é exigível que se obtenha no mínimo 80% da resistência prevista aos 28 dias.

Para a resistência à abrasão a norma NBR 9781 (ABNT, 2013), determina que peças com aplicação em pavimentos destinados ao tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha a cavidade máxima aceitável é de 23 mm. Enquanto, que para pavimentos com solicitações abrasivas e tráfego de veículos especiais o máximo aceitável é de 20 mm.

## 5- MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1- Cimento Portland

O Cimento Portland utilizado nos pavimentos intertravados no experimento foi o CP V-ARI, que apresenta como característica alta resistência inicial. Optou-se pela utilização do CP V-ARI por ser comumente aplicado nas fábricas de artefados pré moldados de concreto. A caracterização do cimento utilizado foi fornecida pelo fabricante, o qual caracterizou-o de acordo com a norma NBR 5733 - Cimento Portland de alta resistência inicial (ABNT, 1991). A composição química do cimento encontra-se na Tabela 5 e a caracterização física e mecânica apresentam-se na Tabela 6.

Tabela 5 – Composição química do cimento Portland CP V-ARI MAX

MgO	SO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>	RI	PF
1,33	2,64	2,50	0,72	3,70

RI = resíduo insolúvel; PF = perda ao fogo.

Tabela 6 – Caracterização física e mecânica do cimento Portland CP V-ARI MAX

IP	FP	EQ	CN	Finura #200	Resistência à Compressão (MPa)			
					1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
(min)	(min)	(mm)	(%)	(%)				
127	187	0,00	31,6	0,01	30,6	44,4	50,1	58,5

IP = início de pega; FP = fim de pega; EQ = expansão a quente; CN = consistência normal.

### 5.2- Agregado graúdo

No experimento foi utilizado agregado graúdo brita nº0 do tipo calcária, proveniente da região de Belo Horizonte, MG. A composição granulométrica e a dimensão máxima característica foram determinadas de acordo com a NBR NM 248 – Agregados – determinação da composição granulométrica (ABNT, 2003); e a massa específica foi obtida conforme a NBR NM 53 – Agregados graúdo – determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água (ABNT, 2009). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Concreto do Departamento de

Engenharia de Materiais de Construção da Escola de Engenharia da UFMG. Na Tabela 7 apresentam-se os resultados.

Tabela 7 – Composição granulométrica, dimensão máxima característica e massa específica do agregado graúdo

Peneiras (mm)	% Retida	% Retida Acumulada
19	0	0
12,5	1	1
9,5	23	25
6,3	53	77
4,75	16	93
2,36	5	98
1,18	0	98
0,6	0	98
0,3	0	98
0,15	0	98
Fundo	2	100
Total	100	-
Módulo de Finura		6,08
Dimensão Máxima Característica (mm)		12,5
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )		2,690

### 5.3- Agregado miúdo

Como agregado miúdo no experimento foi utilizada areia fina quartzosa, proveniente da região de Belo Horizonte, MG. A composição granulométrica e o módulo de finura foram determinados de acordo com a norma NBR NM 248 – Agregados – determinação da composição granulométrica (ABNT, 2003); e a massa específica foi obtida conforme a norma NBR NM 52 – Agregados miúdo – determinação da massa específica e massa específica aparente (ABNT, 2009). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Concreto do Departamento de Engenharia de Materiais de Construção da Escola de Engenharia da UFMG. Na Tabela 8 apresentam-se os resultados.

Tabela 8– Composição granulométrica, módulo de finura e massa específica do agregado miúdo

Peneiras (mm)	% Retida	% Retida Acumulada
4,75	0	0
2,36	28	28
1,18	24	52
0,6	18	70
0,3	9	79
0,15	6	85
Fundo	15	100
Total	100	
Módulo de Finura	3,14	
Dimensão Máxima Característica (mm)	2,36	
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,700	

#### 5.4- Aditivo

Para os concretos foi utilizado o aditivo Rheomix 610, o qual é aplicado na fabricação de artefatos de concreto. Trata-se de um aditivo plastificante líquido, a base de surfactantes, livre de cloretos. Sua aplicação tem por objetivo melhorar a trabalhabilidade em concretos secos e aumentar a resistência dos artefatos. Na Tabela 9 apresenta-se a especificação do aditivo fornecida pelo fabricante.

Tabela 9– Especificação do aditivo Rheomix 610

Descrição	Especificação
Base Química	Surfactantes
Aspecto	Líquido
Cor	Alaranjado
pH	10 - 14
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,010 - 1,050
Sólidos (%)	15 - 19
Viscosidade (cps)	200- 400

## **5.5- Água**

A água utilizada foi a de fornecimento do sistema de abastecimento local.

## **5.6- Rejeito de minério de ferro**

O rejeito aplicado no experimento é proveniente de uma planta piloto de beneficiamento de minério de ferro para a produção de concentrado *pellet feed*. A planta encontra-se localizada no município de Conceição do Mato Dentro, MG. O rejeito utilizado foi coletado e caracterizado segundo os métodos apresentados nos itens 5.6.1 a 5.6.2.5.

### **5.6.1- Coleta das amostras**

As amostras de rejeito de minério de ferro *pellet feed* foram coletadas conforme a norma NBR 10007 – Amostragem de Resíduos (ABNT, 2004). A coleta se deu em leito de secagem, localizado próximo a planta piloto de beneficiamento. O material foi acondicionado em sacos plásticos. Em seguida, as amostras foram enviadas à aos laboratórios da UFMG para realização dos ensaios de caracterização. Para a realização dos ensaios as amostras foram homogenizadas, quarteadas e reduzidas, conforme a norma NBR NM 27 – Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório (ABNT, 2001).

### **5.6.2- Métodos de caracterização do rejeito de *pellet feed***

Para a caracterização do rejeito de *pellet feed* foram realizados ensaios, físicos, químicos, mineralógicos e ambientais, sendo para os quais aplicados os métodos descritos nos itens 5.6.2.1 a 5.6.2.5.

Cabe ressaltar, que após a caracterização física da amostra de rejeito, a mesma foi submetida a um prévio beneficiamento por separação magnética compondo novas

amostras para as demais caracterizações. Este beneficiamento encontra-se descrito no item 5.6.2.2.

#### **5.6.2.1- Caracterização física**

A composição granulométrica e a densidade relativa da amostra de rejeito foram obtidas por ensaios de peneiramento combinado e pelo método do picnômetro, os quais foram realizados no Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Engenharia da UFMG. Para os ensaios de peneiramento combinado foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos.

- Série Tyler de peneiras: Aberturas de 3400, 2400, 1700, 1200, 850, 600, 425, 300, 212, 150, 106, 75, 53, 45, e 38  $\mu\text{m}$ ;
- Divisor de Rifles;
- Vibrador automático;
- Balança semi-analítica;
- Estufa;
- Ácido Clorídrico;
- Balde graduado, trinchas e sacos plásticos.

O peneiramento combinado, consiste em peneiramento à úmido (Figura 17) seguido por peneiramento a seco (Figura 18). O procedimento realizado encontra-se descrito na forma de etapas.



Figura 17- Peneiramento a úmido    Figura 18- Peneiramento a seco

### 1º Etapa

Para o peneiramento a úmido foram utilizadas as peneiras 425  $\mu\text{m}$  e 38  $\mu\text{m}$ , sobre uma vazão de 1 litro/minuto, processado no vibrador automático por 10 minutos. O material retido nas peneiras foi direcionado para secagem em uma estufa a 100 °C. Após a secagem a amostra foi pesada e encaminhada para a segunda etapa.

Cabe ressaltar, que o efluente gerado no peneiramento foi coletado e disposto em repouso em balde graduado para sedimentação das partículas. Para antecipar a sedimentação das partículas foi adicionado aproximadamente 2 mL de ácido clorídrico. O material sedimentado foi encaminhado para secagem em estufa a 100°C e posteriormente pesado. O tempo médio de repouso da amostra para a sedimentação foi de 4 horas.

### 2º Etapa

A segunda etapa consiste no peneiramento a seco, sendo que para esta as peneiras selecionadas foram divididas em dois grupos devido à capacidade máxima de peneiras a serem processadas no vibrador automático. Sendo assim, o primeiro

grupo ficou com a sequência de 3400  $\mu\text{m}$  a 300  $\mu\text{m}$  e o segundo de 212  $\mu\text{m}$  a 38  $\mu\text{m}$ .

Para o primeiro grupo foi utilizado o material retido no peneiramento a úmido, o qual realizou-se peneiramento automático por 15 minutos. Após o processamento o material retido nas peneiras foram pesados e ensacados. Em seguida, o material retido no fundo foi submetido ao quarteamento no divisor de Rifles antes de passar pelo segundo grupo de peneiras. Para o segundo grupo, o tempo de processamento foi de 30 minutos, finalizando o ensaio.

Para determinar a densidade relativa do rejeito por meio da técnica de picnometria foram necessários os seguintes materiais e equipamentos (Figura 19).

- 03 picnômetros de 100 mL;
- Balança semi-analítica;



Figura 19- Vista geral dos picnômetros e balança semi-analítica

O cálculo da densidade do rejeito foi obtido por meio da seguinte fórmula:

(1)

$$\rho_r = \frac{M_r}{V_t - \left(\frac{M_a}{\rho_a}\right)}$$

Onde,

$\rho_r$  = densidade do rejeito;

$M_r$  = massa do rejeito;

$V_t$  = volume total (água + rejeito);

$M_a$  = massa da água;

$\rho_a$  = densidade da água;

O procedimento seguido:

- Pesou-se o picnômetro vazio, previamente limpo e seco;
- Encheu-se o picnômetro com água até o limite de 100 mL, em seguida, pesou o picnômetro com água. A diferença entre os pesos do picnômetro com água e sem água foi a massa de água utilizada. Sabendo o volume de água colocada no picnômetro determinou-se a densidade da água;
- Adicionou-se a amostra de rejeito no picnômetro vazio e, em seguida, o preencheu com um pouco de água, agitou manualmente e completou com água até o limite de 100 mL e a amostra foi pesada novamente. A diferença entre o picnômetro com água e com rejeito e água determinou a massa de rejeito utilizado.

Para assegurar que o procedimento descrito foi aplicado de forma correta, bem como para garantir a qualidade dos resultados, o mesmo foi replicado duas vezes, sendo o resultado final a média de três vias.

#### **5.6.2.2- Beneficiamento do rejeito por separação magnética**

Parte da amostra de rejeito foi submetida a um previo beneficiamento no Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Engenharia da UFMG. O beneficiamento consistiu na remoção da fração magnética, através dos equipamentos LIMS – *Low Intensity Magnetic Separator* (Separador

magnético via úmida de baixa intensidade) (Figura 20) e WHIMS – *Wet High Intensity Magnetic Separator* (Separador magnético via úmida de alta intensidade) (Figura 21).



Figura 20- LIMS - Separador magnético via úmida de baixa intensidade.



Figura 21 - WHIMS - Separador magnético via úmida de alta intensidade.

O procedimento de análise adotado para cada equipamento encontra-se descrito a seguir, sendo aplicado primeiramente o baixo campo magnético, com o LIMS e, em seguida, o alto campo magnético, com o WHIMS.

#### LIMS

- Homogeneização, quarteamento e pesagem de 3 kg da amostra de rejeito;
- Peneiramento em malha de 1,00 mm;
- Moagem do material retido em pilão de aço;
- Peneiramento novamente até que 100 % da amostra passe pela peneira de 1,00 mm;
- Pesagem de 7 kg de água;
- Despejo da água e da amostra no copo do LIMS, em seguida elevou-se o pH da solução até atingir 10,62;
- Após misturar e estabilizar o pH, ligou-se o equipamento para remoção da fração magnética;
- O magnético retido foi despejado em bandeja e colocada na estufa;

- O não magnético foi despejado em outra bandeja e colocada na estufa para a segunda etapa (alto campo magnético - WHIMS);
- Após secagem, as amostras foram pesadas e ensacadas.

### WHIMS

- O material passante do LIMS (não magnético) foi submetido ao quarteamento, do qual foram extraídos duas alíquotas de 45 g/cada;
- Em uma das alíquotas foi adicionado 112 ml de água com pH controlado a 10,5;
- Com o equipamento ligado, a solução (rejeito e água) foi despejada. No fim da calha do equipamento foi colocado um balde para recolher o material passante;
- Após despejar a amostra, foi lançado um litro de água limpa no equipamento para remoção das partículas não magnéticas retidas. Ao remover todo o material não magnético retirou-se o balde e um novo balde limpo foi colocado;
- Com o balde limpo desligou-se o campo magnético, removendo o material magnético retido;
- As mesmas etapas foram repetidas com a outra amostra de 45 g;
- Os baldes contendo os materiais magnético e não magnético ficaram em repouso para decantação. Em seguida, retirou-se o excesso de água e as partículas sólidas foram secas em estufa;
- Após secagem, as amostras foram pesadas e ensacadas.

Após o beneficiamento foram obtidas 03 (três) novas amostras além do rejeito bruto, sendo as mesmas: o não magnético do LIMS; o magnético e o não magnético do WHIMS.

### 5.6.2.3- Caracterização química

A caracterização química e os ensaios de perda ao fogo das amostras de rejeito foram realizadas no Laboratório de Caracterização Mineral da Empresa Anglo American. A composição química foi obtida pelo método de fluorescência de raios – X (FRX), utilizando-se um espectrômetro da marca Panalytical, modelo Axios (Figura 22), com tubo Rh e um detector de dispersão de comprimento de onda (WDS). As amostras de rejeito foram pulverizadas no pulverizador 325 *mesh* e preparadas por prensagem utilizando como aglomerante o ácido bórico P.A. Nas análises foram utilizados quatro padrões certificados como curvas de caracterização específica. Para os ensaios de perda ao fogo das amostras foi utilizada uma mufla à temperatura de 1000°C por 1 hora.



Figura 22- Espectrômetro de fluorescência de raios – X

#### 5.6.2.4- Caracterização mineralógica

Para a caracterização mineralógica, as amostras de rejeito foram previamente pulverizadas no Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Engenharia da UFMG, utilizando o equipamento moinho de panela para obtenção das amostras em pó.

Em seguida, o ensaio foi realizado no Laboratório de Difração de Raios – X do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola de Engenharia da UFMG, onde foi utilizado o Difratorômetro de Raios-X (DRX), marca Philips (Panalytical), sistema X'Pert-APD, controlador PW 3710/31, gerador PW 1830/40, goniômetro PW 3020/00. Tubo de cobre ( $Z=29$ ):  $\lambda$   $K\alpha$  médio =  $1,54184\text{\AA}$  -  $\lambda\alpha_1 = 1,54056\text{\AA}$  (Figura 23). Para a prática foram realizados espectros de difração de raios-X, variando angulações a uma velocidade de 0,05 entre  $3^\circ$  e  $80^\circ$ , sendo o equipamento ajustado em 20 amperes e 40 Kw.



Figura 23- Difratorômetro de Raios-X

### **5.6.2.5- Caracterização ambiental**

A caracterização ambiental das amostras de rejeito foi realizada em laboratório da empresa *Analytical Solutions*, por ensaios de solubilização e lixiviação, conforme as NBR 10005 – Lixiviação de Resíduos (ABNT, 2004), e NBR 10006 – Solubilização de Resíduos (ABNT, 2004), de acordo com a NBR 10004 – Resíduos Sólidos (ABNT, 2004).

### **5.7- Dosagem dos traços de concreto**

Para o desenvolvimento do experimento inicialmente foi proposto à reprodução manual em laboratório do traço comumente utilizado por uma fábrica de artefatos de concreto, localizada na região de Matozinhos, MG. O traço, em massa, adotado para o concreto de referência foi de 1: 1,255: 2,454: 1,255 (cimento: pó de pedra: areia: brita), relação água/cimento igual a 0,40 e adição de 0,3% (da massa do cimento) de aditivo plastificante Rheomix 610.

O traço inicialmente proposto foi submetido a teste na betoneira. Durante o teste, o concreto apresentou baixa fluidez, impossibilitando a trabalhabilidade e o adensamento do concreto em uma mesa vibratória, uma vez que nesse estudo não se empregou o método de prensagem. Numa tentativa de corrigir o traço, foram acrescentados água e cimento, alterando a proporção para: 1: 1,156: 2,348: 1,156 (cimento: pó de pedra: areia: brita), relação água/cimento igual a 0,77. A proporção de 0,3% do aditivo plastificante Rheomix 610 foi mantida. Devido o aumento significativo da relação água/cimento e a falta de equipamento adequado para a reprodução do traço de fábrica foi dimensionado um novo traço de referência para moldagem dos corpos de prova em mesa vibratória.

Para o dimensionamento do novo traço foi adotado o método de cálculo de dosagem ACI (*American Concrete Institute*), tendo como parâmetro básico a resistência à compressão aos 28 dias de 35 MPa. O novo traço apresentou a seguinte proporção, em massa: 1: 0,971: 1,496 (cimento: areia: brita), relação água/cimento igual a 0,505 e adição de 0,3% (da massa do cimento) de aditivo

plastificante Rheomix 610. O pó de pedra foi removido devido o equipamento utilizado para o adensamento não permitia uma trabalhabilidade satisfatória com o pó.

Com a definição do traço de referência foram definidos mais dois traços contendo as mesmas proporções, entretanto, diferenciando entre si pelo percentual de adição de 5 e 10% rejeito de minério de ferro *pellet feed* em relação à massa de cimento. Na Tabela 10 apresentam-se os traços de concreto e o consumo de materiais utilizados no experimento.

Tabela 10 – Traços de concreto e o consumo de materiais por m<sup>3</sup> de concreto

Traço	Proporção cimento:areia:brita	Rejeito (kg)	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	A/C	Aditivo (%)
Referência	1: 0,971: 1,496	0	608	590,4	909,6	0,505	0,3
5% Rejeito	1: 0,971: 1,496	30,4	608	590,4	909,6	0,505	0,3
10% Rejeito	1: 0,971: 1,496	60,8	608	590,4	909,6	0,505	0,3

### 5.8- Confeção dos corpos de prova de concreto

A moldagem dos corpos de prova de concreto foi realizada no Laboratório de Concreto do Departamento de Engenharia de Materiais de Construção da Escola de Engenharia da UFMG e consistiu basicamente em duas etapas: pesagem e mistura dos materiais. Os agregados e rejeito se encontravam secos antes da mistura dos concretos.

Os materiais de cada traço foram pesados em balança com capacidade de 100 kg. O aditivo, após pesado em balança com capacidade de 32 kg, foi misturado em parte da água do concreto com o objetivo de facilitar sua mistura. Para cada traço dosado foram fabricados, aproximadamente, 27 litros de concreto. A mistura dos materiais foi realizada em betoneira de eixo vertical com capacidade de 120 litros (Figura 24), adotando-se a seguinte sequência:

1. Adição da brita 0;
2. Funcionamento da betoneira;
3. Adição da areia e parte da água;
4. Mistura dos materiais por aproximadamente 1 minuto;
5. Adição de parte da água com aditivo diluído;
6. Adição do cimento;
7. Adição do rejeito, quando aplicável;
8. Adição da parte restante da água com aditivo diluído;
9. Mistura dos materiais por aproximadamente 5 minutos



Figura 24 – Betoneira utilizada na confecção do concreto.

### **5.9- Moldagem dos corpos de prova**

A moldagem dos corpos de prova foi realizada no Laboratório de Concreto do Departamento de Engenharia de Materiais de Construção da Escola de Engenharia da UFMG. Para a moldagem dos corpos de prova foram utilizadas fôrmas plásticas de produção de peças retangulares de pavimento intertravo com dimensões 10 x 20 x 8 cm (largura x comprimento x espessura), conforme Figura 25. Para a moldagem, as fôrmas foram previamente limpas e untadas com óleo mineral para facilitar a desmoldagem. O enchimento das fôrmas foi realizado manualmente, sendo o

adensamento do concreto realizado em mesa vibratória (Figura 26). O acabamento da face superior dos corpos de prova foi feito por alisamento da superfície.



Figura 25 – Fôrmas utilizadas na moldagem dos corpos de prova



Figura 26 – Mesa vibratória utilizada no adensamento dos concretos

Após 24 horas, os corpos de prova foram transferidos para a câmara úmida. Na câmara úmida os mesmos permaneceram por sete dias, sendo então desmoldados, identificados e levados novamente para a câmara úmida, onde permaneceram até a

data dos ensaios. Para cada traço de concreto foram moldados 12 corpos de prova, sendo 6 para ensaio de resistência à compressão, 3 para o ensaio de absorção de água e 3 para o ensaio de resistência à abrasão, conforme especificação da NBR 9781 – Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio (ABNT, 2013).

#### 5.10- Ensaio de resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado no Laboratório de Concreto do Departamento de Engenharia de Materiais de Construção da Escola de Engenharia da UFMG. Para o ensaio de resistência à compressão foram utilizados 18 corpos de prova, sendo 6 amostra por traço. Os corpos de prova foram capeados com pasta de cimento (Figura 27), saturados em água por 24 horas (Figura 28) antes do ensaio, e rompidos na idade de 28 dias. Utilizou-se uma prensa hidráulica EMIC PC200, com capacidade de carga de 200 toneladas e sensibilidade de 10 N (Figura 29). Os ensaios foram realizados conforme a norma NBR 9781 – Peças de concreto para pavimentação – especificação e métodos de ensaio (ABNT, 2013).



Figura 27- Corpos de prova capeados com pasta de cimento



Figura 28- Corpos de prova imersos em tanque com água



Figura 29 – Prensa hidráulica utilizada no ensaio de compressão.

Os resultados obtidos foram submetidos ao cálculo da resistência característica à compressão, pela equação 2, conforme NBR 9781 – Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio (ABNT, 2013).

:

(2)

$$f_{pk,est} = f_p - t \times s$$

Onde:

$f_{pk,est}$  = resistência característica à compressão, em MPa;

$f_p$  = resistência média dos corpos de prova por traço, em MPa;

$t$  = coeficiente de Student, conforme NBR 9781 (2013);

$s$  = desvio padrão da amostra, em MPa =  $\sqrt{\frac{\sum(f_p - f_{pi})^2}{n-1}}$

$f_{pi}$  = resistência individual dos corpos de prova, em MPa;

$n$  = número de corpos de provas por traço;

O coeficiente de Student aplicado na equação foi de 0,920, em função do número de corpos de provas por traço, conforme a norma NBR 9781 – Peças de concreto para pavimentação – especificação e métodos de ensaio (ABNT, 2013).

### 5.11- Ensaio de absorção de água

O ensaio de absorção de água foi realizado no Laboratório de Concreto do Departamento de Engenharia de Materiais de Construção da Escola de Engenharia da UFMG e foi realizado conforme a NBR 9781 – Peças de concreto para pavimentação – especificação e métodos de ensaio (ABNT, 2013). Para o ensaio de absorção de água foram utilizados 9 corpos de prova, sendo 3 por traço. Os corpos de prova foram saturados em água por 24 horas, em seguida a taxa de ganho de massa foi monitorada a cada 2 horas, pesando-se as amostras em uma balança

Explorer, com capacidade de 32000 g e erro de 0,1 g (Figura 30), até se obter a estabilização, ou seja, constância de massa. Após a estabilização da massa, os corpos de prova foram submetidos a secagem em estufa Biopar por 24 horas em temperatura  $110\pm 5^{\circ}\text{C}$  e em seguida a taxa de perda de massa foi monitorada a cada 2 horas até a sua estabilização. A Figura 31 ilustra o processo de secagem dos corpos de prova em estufa.



Figura 30– Pesagem de corpo de prova



Figura 31– Secagem dos corpos de prova em estufa

As pesagens dos corpos de prova saturados e secos foram submetidas ao cálculo da absorção de água, pela seguinte equação:

(3)

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100$$

Onde:

$A$  = absorção do corpo de prova, em %;

$m_1$  = massa do corpo de prova seco, em g;

$m_2$  = massa do corpo de prova saturado, em g.

Na apresentação dos resultados de absorção de água também foram calculadas as médias aritméticas por traço.

### **5.12- Ensaio de resistência à abrasão**

O ensaio de resistência à abrasão foi realizado no Laboratório de Tecnologia de Rochas do Departamento de Engenharia de Minas, da Escola de Engenharia da UFMG.

Devido a dificuldade de acesso ao dispositivo de abrasão especificado na NBR 9781 – Peças de concreto para pavimentação – especificação e métodos de ensaio (ABNT, 2013), o ensaio foi realizado conforme a NBR 12042 – Materiais inorgânicos – determinação do desgaste por abrasão (ABNT, 1992). O equipamento utilizado no ensaio foi um Abrazímetro Amsler da marca Pavitest, de fabricação da Contenco Ind. e Com. Ltda., conforme Figura 32.



Figura 32 – Abrazímetro utilizado no ensaio de abrasão

Para o ensaio foram utilizados 9 corpos de prova nas idades de 35 dias, sendo 3 por traço, e de cada corpo de prova foram extraídas 2 amostras nas dimensões de 70 x 70 x 30 mm por corte em serra circular diamantada de 350 mm de componentes acabados, conforme Figura 33.



Figura 33– Serra circular utilizado no corte dos corpos de prova

Após o corte, sobre a face oposta a de desgaste das amostras foram definidos 4 pontos de leitura para o monitoramento das perdas em milímetros (Figura 34). O monitoramento das perdas foi realizado com um paquímetro, conforme Figura 35.



Figura 34 – Definição dos pontos de monitoramento da amostra

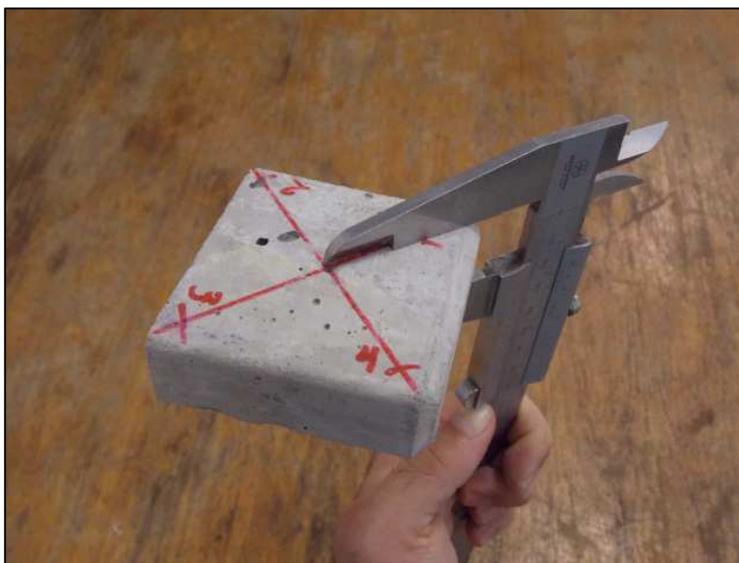


Figura 35 – Monitoramento da espessura da amostra

Para a obtenção dos resultados foram realizadas três leituras, uma inicial em 0 voltas, uma parcial em 250 voltas (equivalente a 500 m) e uma final em 500 voltas (equivalente a 1000 m). Os resultados da perda de espessura parcial e final foram obtidos pela seguinte fórmula:

(4)

$$P = \frac{((A_1 - A_2) + (B_1 - B_2) + (C_1 - C_2) + (D_1 - D_2))}{4}$$

Onde:

$P$  = perda por desgaste, expressa em milímetros (mm);

$A_1$  = espessura no ponto 1 antes do ensaio;

$A_2$  = espessura no ponto 1 depois do ensaio;

$B_1$  = espessura no ponto 2 antes do ensaio;

$B_2$  = espessura no ponto 2 depois do ensaio;

$C_1$  = espessura no ponto 3 antes do ensaio;

$C_2$  = espessura no ponto 3 depois do ensaio;

$D_1$  = espessura no ponto 4 antes do ensaio;

$D_2$  = espessura no ponto 4 depois do ensaio.

## 6- RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1- Caracterização física do rejeito

A composição granulométrica e a massa específica da amostra de rejeito bruto encontram-se na Tabela 11.

Tabela 11- Composição granulométrica e massa específica do rejeito bruto

Peneira ( $\mu\text{m}$ )	% Retida	% Retida Acumulada
3400	0,10	0,10
2400	0,04	0,15
1700	0,06	0,21
1200	0,13	0,34
850	0,16	0,51
600	0,13	0,64
425	0,12	0,76
300	0,12	0,88
212	0,56	1,45
150	5,40	6,84
106	19,70	26,54
75	15,93	42,48
53	12,92	55,40
45	8,28	63,68
38	7,47	71,15
<38	28,85	100,00
Soma	100,00	-
Método		Massa Específica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
Picnometria		2,72

Analisando-se a composição granulométrica apresentada na Tabela 2, nota-se que 57,52% do rejeito enquadra-se na faixa *filler* que, segundo SILVA *et al.* (2005) classificam *filler* os grãos que passam pela peneira de malha 75  $\mu\text{m}$ . Além disso, percebe-se um percentual de 28,85% abaixo de 38  $\mu\text{m}$ , podendo este enquadrar na faixa *microfiller* de adições minerais. Segundo DAL MOLIN (2005), o *microfiller* deve apresentar diâmetro médio próximo ao diâmetro médio do cimento, o qual encontra-se entre 10 e 12  $\mu\text{m}$  (KIHARA e CENTURIONE, 2005).

Com relação à massa específica, o rejeito apresenta resultado ( $2,72 \text{ g/cm}^3$ ) próximo ao obtido para a o agregado calcáreo ( $2,69 \text{ g/cm}^3$ ) empregado nessa pesquisa.

## 6.2- Caracterização química do rejeito

A Tabela 12 apresenta a composição química das quatro amostras de rejeito *pellet feed*, sendo a amostra 1 o rejeito bruto e as amostras 2, 3 e 4 referem-se ao rejeito bruto pós beneficiamento por separação magnética (item 5.6.2.2). A amostra 2 refere-se ao rejeito não magnético do LIMS, a amostra 3 refere-se ao rejeito não magnético do WHIMS e a amostra 4 ao rejeito magnético do WHIMS.

Tabela 12 – Composição química das amostras de rejeito

Composição Química	Amostra 1 (%)	Amostra 2 (%)	Amostra 3 (%)	Amostra 4 (%)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26,51	26,51	9,34	89,91
SiO <sub>2</sub>	67,85	68,28	84,66	6,44
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,62	2,24	2,57	0,93
P	0,01	0,01	0,02	0,02
Mn	0,02	0,02	0,01	0,03
CaO	0,04	0,05	0,07	0,03
MgO	0,09	0,09	0,11	0,04
TiO <sub>2</sub>	0,04	0,04	0,02	0,17
K <sub>2</sub> O	0,25	0,24	0,30	0,08
Na <sub>2</sub> O	0,04	0,04	0,05	0,01
Perda ao Fogo	1,00	0,90	1,00	0,50
Total (%)	98,49	98,42	98,14	98,14

Analisando os dados da Tabela 3 observa-se que, em média, 95% das amostras são compostas por Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + SiO<sub>2</sub>. Os resultados indicam que praticamente não houve variação da composição química para as amostras 1 e 2, evidenciando que o beneficiamento por separação magnética no sistema LIMS não foi efetivo na redução do teor Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> do rejeito. Por outro lado, o beneficiamento por separação magnética no sistema WHIMS possibilitou maior eficiência, promovendo a redução do teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> presente no rejeito (amostra 3 – não magnética). Grande parte da fração metálica permaneceu na amostra magnética (amostra 4).

Os resultados de perda ao fogo não excederam a 1% da composição das amostras analisadas.

### 6.3- Caracterização mineralógica do rejeito

O método de análise mineralógica por meio da difração de raios – X baseia-se na comparação dos valores das distâncias interplanares e das intensidades dos picos nos difratogramas das amostras analisadas e uma amostra de referência, utilizando os padrões do banco de dados do ICDD – *International Centre for Diffraction Data* e o software *X'Pert High Score*.

As Figuras 36 a 39 apresentam os difratogramas obtidos pela difração de raios – X, referentes às amostras de rejeito de minério de ferro *pellet feed*, sendo estas: rejeito bruto, não magnético do LIMS, magnético e não magnético do WHIMS.

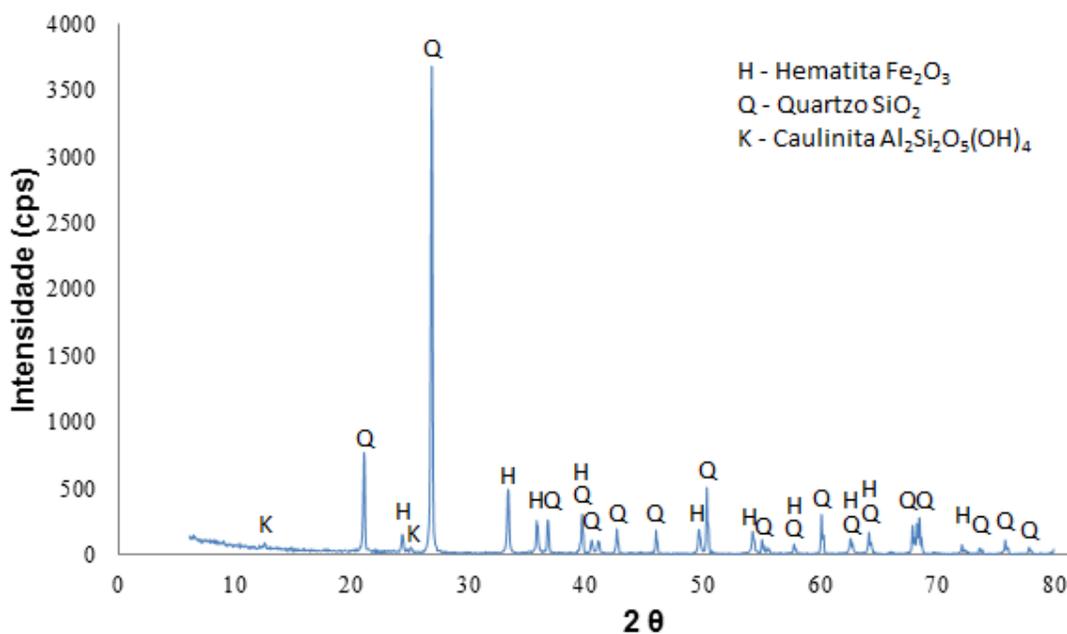


Figura 36- Difratograma do rejeito bruto – amostra 1

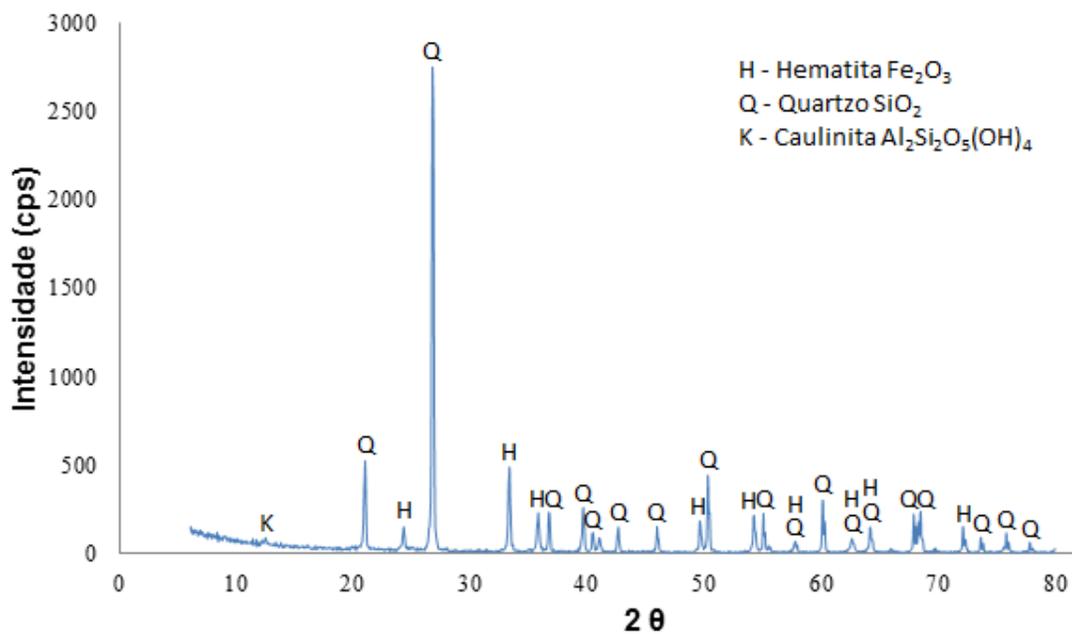


Figura 37- Difratoograma do não magnético do LIMS – amostra 2

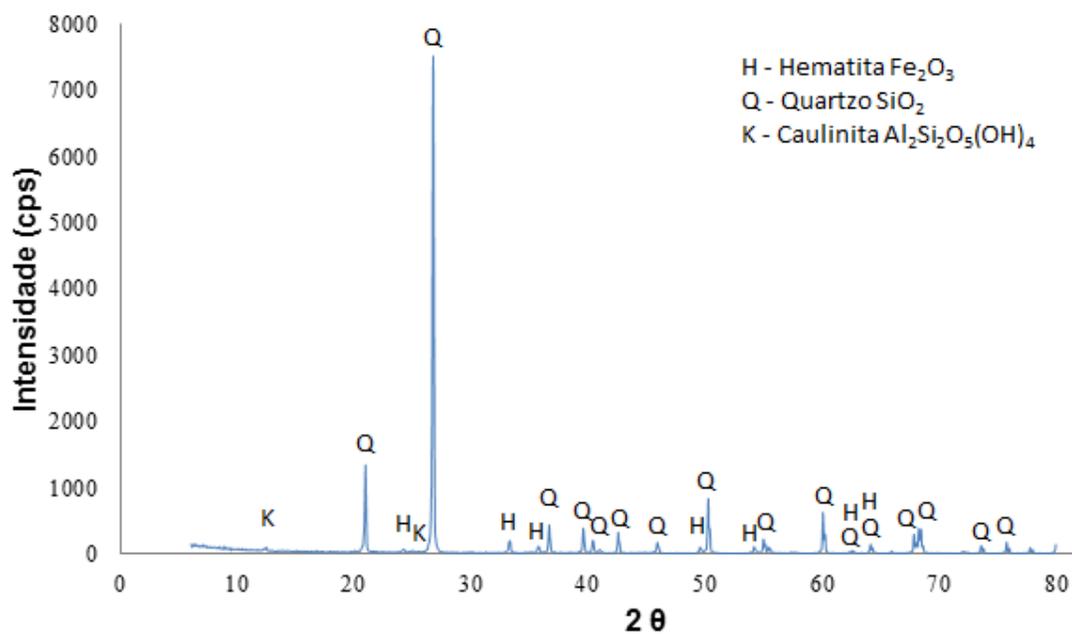


Figura 38- Difratoograma do não magnético do WHIMS – amostra 3

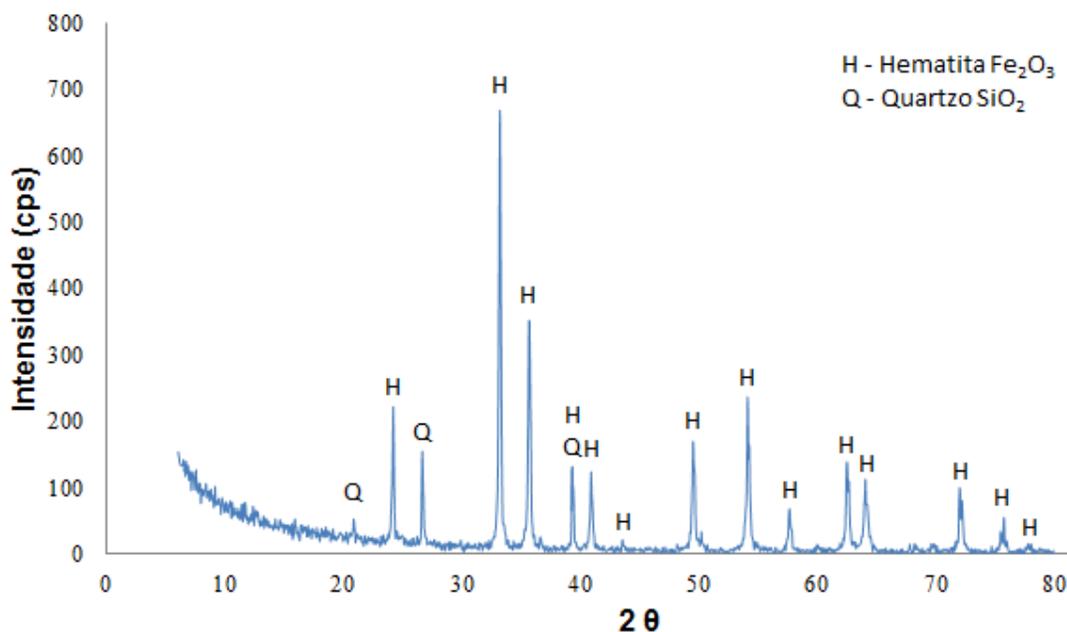


Figura 39- Difratoograma do magnético do WHIMS – amostra 4

Segundo análise do banco de dados do ICDD foram identificados três compostos nos difratogramas das Figuras 36 a 39, sendo estes, o quartzo (Q) - SiO<sub>2</sub>, a hematita (H) - Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e a caulinita (K) - Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>. A presença da hematita se deve as perdas no processo de beneficiamento do minério de ferro. Com relação à caulinita, essa fase é devido à presença de argila no rejeito. As amostras 1 e 2 apresentaram semelhanças em seus difratogramas, resultado esse esperado devido à pequena variação em suas composições químicas.

Com relação ao difratograma da Figura 39, a caulinita foi removida pelo processo de concentração magnética do WHIMS. Desta forma, somente foram encontrados picos intensos de hematita e em menor intensidade, de quartzo. Conseqüentemente, o não magnético do WHIMS apresentou picos intensos de quartzo e pequenos traços de hematita e caulinita.

Apesar da amostra 3 (não magnético do WHIMS), aparentemente, se apresentar mais adequada para aplicação no experimento, optou-se pela aplicação do rejeito bruto. Neste caso, os ensaios de classificação ambiental e confecção dos concretos foram realizados somente com a amostra de rejeito bruto e não para as demais

amostras obtidas pelo processo de beneficiamento por separação magnética, uma vez que, atualmente, na mineradora o rejeito é gerado com as características da amostra bruta analisada.

Em geral, o rejeito bruto é composto por quartzo -  $\text{SiO}_2$ , a hematita -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e a caulinita -  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ . A hematita e o quartzo representam 94,36% da amostra, sendo o quartzo em maior proporção, com 68%.

#### 6.4- Caracterização ambiental do rejeito

Para a caracterização foram analisados os parâmetros definidos nos anexos F e G da NBR 10004 – Resíduos Sólidos (ABNT, 2004). Os resultados obtidos encontram-se apresentados nas Tabelas 13 e 14. Além dos parâmetros e resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização, as Tabelas 4 e 5 apresentam os limites de detecção e os limites de quantificação para cada parâmetro analisado. O limite de detecção representa a menor quantidade de analito na amostra teste que pode ser verdadeiramente distinguida de zero (THOMPSON *et al.*, 2002) e o limite de quantificação representa a menor concentração do analito que pode ser determinada com um nível aceitável de precisão e exatidão (INMETRO, 2003).

Tabela 13– Resultado dos ensaios de lixiviação da amostra de rejeito bruto

Parâmetro	Unidade	L.D.	L.Q.	Resultado	VMP
Inorgânicos					
Arsênio	(mg/L)	0,002	0,005	N.D.	1
Bário	(mg/L)	0,002	0,01	0,103	70
Cádmio	(mg/L)	0,0003	0,001	N.D.	0,5
Chumbo	(mg/L)	0,002	0,01	N.D.	1
Cromo Total	(mg/L)	0,005	0,01	N.D.	5
Fluoretos	(mg/L)	0,01	0,05	0,360	150
Mercúrio	(mg/L)	0,0002	0,001	N.D.	0,1
Prata	(mg/L)	0,005	0,01	N.D.	5
Selênio	(mg/L)	0,001	0,005	N.D.	1
Pesticidas					
Aldrin + Dieldrin	(mg/L)	5E-06	3E-05	N.D.	0,003
Clordano (todos os isômeros)	(mg/L)	5E-06	3E-05	N.D.	0,02

## Continuação

DDT (p, p' DDT + p, p' DDD + p, p' DDE)	(mg/L)	5E-06	3E-05	N.D.	0,2
2,4-D (Ácido 2,4-Diclorofenoxidoacético)	(mg/L)	0,001	0,005	N.D.	3
Endrin	(mg/L)	5E-06	3E-05	N.D.	0,06
Heptacloro e seus epóxidos	(mg/L)	5E-06	3E-05	N.D.	0,003
Lindano	(mg/L)	5E-06	3E-05	N.D.	0,2
Metoxicloro	(mg/L)	0,00005	0,0002	N.D.	2
Pentaclorofenol	(mg/L)	0,00005	0,0002	N.D.	0,9
Toxafeno	(mg/L)	0,00005	0,0002	N.D.	0,5
2,4,5-T (Ácido 2,4,5-Triclorofenoxidoacético)	(mg/L)	0,001	0,005	N.D.	0,2
2,4,5-TP (Ácido a-2,4,5-Triclorofenoxidopropiônico)	(mg/L)	0,001	0,005	N.D.	1
Outros Orgânicos					
Benzeno	(mg/L)	0,0001	0,001	N.D.	0,5
Benzo[a]pireno	(mg/L)	0,00005	0,0002	N.D.	0,07
Cloreto de vinila	(mg/L)	0,0001	0,001	N.D.	0,5
Clorobenzeno	(mg/L)	0,0001	0,001	N.D.	100
Clorofórmio	(mg/L)	0,0001	0,001	N.D.	6
Cresol Total	(mg/L)	0,00005	0,0002	N.D.	200
o-Cresol	(mg/L)	0,00005	0,0002	N.D.	200
m-Cresol	(mg/L)	0,00005	0,0002	N.D.	200
p-Cresol	(mg/L)	0,00005	0,0002	N.D.	200
1,4-Diclorobenzeno	(mg/L)	0,0001	0,001	N.D.	7,5
1,2-Dicloroetano	(mg/L)	0,0001	0,001	N.D.	1
1,1-Dicloroetileno	(mg/L)	0,0001	0,001	N.D.	3
2,4-Dinitrotolueno	(mg/L)	0,00005	0,0002	N.D.	0,13
Hexaclorobenzeno	(mg/L)	5E-06	3E-05	N.D.	0,1
Hexaclorobutadieno	(mg/L)	0,00005	0,0002	N.D.	0,5
Hexacloroetano	(mg/L)	5E-06	3E-05	N.D.	3
Metiletilcetona	(mg/L)	0,0001	0,001	N.D.	200
Nitrobenzeno	(mg/L)	0,00005	0,0002	N.D.	2
Piridina	(mg/L)	0,0001	0,001	N.D.	5
Tetracloroeto de carbono	(mg/L)	0,0001	0,001	N.D.	0,2
Tetracloroetileno	(mg/L)	0,0001	0,001	N.D.	4
Tricloroetileno	(mg/L)	0,0001	0,001	N.D.	7
2,4,5-Triclorofenol	(mg/L)	0,00005	0,0002	N.D.	400
2,4,6-Triclorofenol	(mg/L)	0,00005	0,0002	N.D.	20

Legenda: L.D. = Limite de Detecção; L.Q.= Limite de Quantificação; VMP = Valor Máximo Permitido pela NBR 10.004 (2004); N.D. = Não Detectado.

Analisando os resultados apresentados na Tabela 13, observa-se que dos 45 parâmetros de lixiviação avaliados, somente o bário e os fluoretos foram detectados, mas ainda sim, em concentrações inferiores aos valores máximos permitidos pela norma NBR 10004 – Resíduos Sólidos (ABNT, 2004).

Para os parâmetros não detectados observa-se que os limites de detecção e quantificação dos métodos aplicados em cada parâmetro analisado, encontram-se significativamente inferiores aos valores máximos permitidos, tornando-os irrelevantes para a caracterização ambiental. Desta forma, pode-se afirmar que o rejeito bruto do minério de ferro *pellet feed*, segundo a norma NBR 10004 – Resíduos Sólidos (ABNT, 2004), é classificado como sendo resíduo classe II - não perigoso.

Tabela 14 – Resultado dos ensaios de solubilização da amostra de rejeito bruto

Parâmetro	Unidade	L.D.	L.Q.	Resultado	VMP
Aldrin + Dieldrin	(mg/L)	5E-06	3E-05	N.D.	3E-05
Alumínio	(mg/L)	0,01	0,05	0,930	0,2
Arsênio	(mg/L)	0,002	0,005	N.D.	0,01
Bário	(mg/L)	0,002	0,01	0,067	0,7
Cádmio	(mg/L)	0,0003	0,001	N.D.	0,005
Chumbo	(mg/L)	0,002	0,01	N.D.	0,01
Cianetos	(mg/L)	0,001	0,005	N.D.	0,07
Clordano (todos os isômeros)	(mg/L)	5E-06	3E-05	N.D.	0,0002
Cloretos	(mg/L)	0,04	0,5	N.D.	250
Cobre	(mg/L)	0,001	0,005	0,010	2
Cromo Total	(mg/L)	0,005	0,01	N.D.	0,05
2,4-D (Ácido 2,4-Diclorofenoxidoacético)	(mg/L)	0,001	0,005	N.D.	0,03
DDT (todos os isômeros)	(mg/L)	5E-06	3E-05	N.D.	0,002
Endrin	(mg/L)	5E-06	3E-05	N.D.	0,0006
Fenóis Totais	(mg/L)	0,00005	0,0002	N.D.	0,01
Ferro Total	(mg/L)	0,01	0,05	1,497	0,3
Fluoretos	(mg/L)	0,004	0,02	N.D.	1,5
Heptacloro e seu epóxido	(mg/L)	5E-06	3E-05	N.D.	3E-05
Hexaclorobenzeno	(mg/L)	5E-06	3E-05	N.D.	0,001
Lindano (Gama-BHC)	(mg/L)	5E-06	3E-05	N.D.	0,002
Manganês	(mg/L)	0,005	0,01	0,151	0,1
Mercúrio	(mg/L)	0,0002	0,001	N.D.	0,001
Metoxicloro	(mg/L)	0,00005	0,0002	N.D.	0,02

*Continuação*

Nitrato (Expresso em N)	(mg/L)	0,02	0,11	N.D.	10
Prata	(mg/L)	0,005	0,01	N.D.	0,05
Selênio	(mg/L)	0,001	0,005	N.D.	0,01
Sódio	(mg/L)	0,1	0,2	1,019	200
Sulfato (Expresso em SO <sub>4</sub> )	(mg/L)	0,03	0,5	N.D.	250
Surfactantes	(mg/L)	0,024	0,045	N.D.	0,5
Toxafeno	(mg/L)	0,00005	0,0002	N.D.	0,005
2,4,5-T (Ácido 2,4,5-Triclorofenoxidoacético)	(mg/L)	0,001	0,005	N.D.	0,002
2,4,5-TP (Ácido a-2,4,5-Triclorofenoxidopropiônico)	(mg/L)	0,001	0,005	N.D.	0,03
Zinco	(mg/L)	0,005	0,01	0,021	5

Legenda: L.D. = Limite de Detecção; L.Q.= Limite de Quantificação; VMP = Valor Máximo Permitido pela NBR 10.004 (2004); N.D. = Não Detectado.

Na Tabela 14 é apresentado o resultado dos ensaios de solubilização da amostra de rejeito bruto. Para os ensaios, foram avaliados 33 parâmetros, destes apenas 7 apresentaram concentrações detectáveis, a saber: o alumínio, o bário, o cobre, o ferro total, o manganês, o sódio e o zinco . Dos resultados obtidos, destacam-se 3 parâmetros, o alumínio, o ferro total e o manganês por apresentarem concentrações superiores aos valores máximos permitidos.

Cabe ressaltar que os limites de detecção dos métodos aplicados em cada parâmetro analisado, encontram-se significativamente inferiores aos valores máximos permitidos, conferindo garantia aos resultados obtidos.

Desta forma, pode-se afirmar que a amostra de rejeito bruto de minério de ferro *pellet feed* é classificada, segundo a NBR 10004 – Resíduos Sólidos (ABNT, 2004), como resíduo classe II A – não inerte.

## 6.5- Resistência à compressão

Nas Tabelas 15 a 17 apresentam-se os resultados do ensaio de compressão realizados nos corpos de prova retangulares provenientes do traço do concreto de referência e dos 2 traços com adição de rejeito de minério de ferro *pellet feed* nas proporções de 5 e 10%, na idade de 28 dias.

Tabela 15– Resistência à compressão do concreto de referência aos 28 dias

Corpo de Prova	Medida Nominal (mm)	Medida Real (mm)	Área de Carregamento (mm <sup>2</sup> )	Carga de Ruptura (N)	Resistência Individual (MPa)
CP 1	200 x 100 x 80	197,6 x 98,9 x 81,1	6361,72	197473,75	31,04
CP 2	200 x 100 x 80	197,6 x 98,3 x 81,5	6361,72	173956,57	27,34
CP 3	200 x 100 x 80	197,0 x 98,0 x 81,5	6361,72	195090,65	30,67
CP 4	200 x 100 x 80	196,4 x 97,6 x 85,4	6361,72	214067,20	33,65
CP 5	200 x 100 x 80	196,9 x 97,8 x 82,4	6361,72	202485,13	31,83
CP 6	200 x 100 x 80	196,1 x 97,7 x 81,6	6361,72	162492,18	25,54
Resistência Média (MPa)					30,01
Desvio Padrão (MPa)					3,00
Resistência Característica Estimada (MPa)					27,25

Tabela 16 – Resistência à compressão do concreto com 5% de rejeito aos 28 dias

Corpo de Prova	Medida Nominal (mm)	Medida Real (mm)	Área de Carregamento (mm <sup>2</sup> )	Carga de Ruptura (N)	Resistência Individual (MPa)
CP 1	200 x 100 x 80	196,0 x 98,0 x 82,3	6361,72	202367,45	31,81
CP 2	200 x 100 x 80	197,5 x 98,0 x 82,7	6361,72	207261,14	32,58
CP 3	200 x 100 x 80	197,0 x 98,0 x 82,8	6361,72	174907,85	27,49
CP 4	200 x 100 x 80	197,3 x 97,9 x 83,9	6361,72	212517,69	33,41
CP 5	200 x 100 x 80	197,4 x 98,0 x 83,5	6361,72	203446,22	31,98
CP 6	200 x 100 x 80	197,3 x 98,0 x 82,0	6361,72	186970,46	29,39
Resistência Média (MPa)					31,11
Desvio Padrão (MPa)					2,22
Resistência Característica Estimada (MPa)					29,06

Tabela 17 – Resistência à compressão do concreto com 10% de rejeito aos 28 dias

Corpo de Prova	Medida Nominal (mm)	Medida Real (mm)	Área de Carregamento (mm <sup>2</sup> )	Carga de Ruptura (N)	Resistência Individual (MPa)
CP 1	200 x 100 x 80	196,8 x 97,8 x 83,9	6361,72	176937,89	27,81
CP 2	200 x 100 x 80	197,0 x 97,4 x 82,0	6361,72	180762,62	28,41
CP 3*	200 x 100 x 80	197,0 x 98,5 x 82,9	6361,72	104827,02	16,48
CP 4	200 x 100 x 80	196,6 x 98,4 x 82,0	6361,72	201053,31	31,60
CP 5	200 x 100 x 80	196,9 x 98,0 x 83,0	6361,72	196159,61	30,83
CP 6	200 x 100 x 80	196,8 x 98,4 x 83,7	6361,72	183626,27	28,86
Resistência Média (MPa)					29,51
Desvio Padrão (MPa)					1,63
Resistência Característica Estimada (MPa)					28,01

\* O resultado do CP 3 não foi considerado no cálculo do desvio padrão, resistência média e característica.

Pelos os resultados das Tabelas 15 a 17 nota-se, em geral, que os traços apresentaram resultados próximos, no entanto, destacou-se o traço contendo a adição de 5% de rejeito, o qual apresentou uma resistência média sensivelmente superior ao traço de referência, representando um ganho de resistência de 3,7%. Entretanto, verifica-se que na adição de 10% de rejeito o resultado foi diferente, obtendo uma resistência média ligeiramente inferior ao traço de referência, representando uma perda de resistência de 1,7%.

Analisando-se os resultados da resistência característica estimada, nota-se que devido ao maior desvio padrão obtido no traço de referência (3,00 MPa), este concreto apresentou resistência característica inferior, porém, próxima dos demais traços, destacando-se novamente o traço contendo 5% de rejeito, o qual obteve um resultado de 29,06 MPa, representando um ganho de resistência de 6,6% em relação ao traço de referência.

O bom desempenho apresentado pelo traço com a adição de 5% de rejeito pode está relacionado ao efeito *filler* do rejeito que promove o empacotamento granulométrico e pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento (DAL MOLIN, 2005).

No entanto, ressalta-se que a norma NBR 9781 – Peças de concreto para pavimentação – especificação e métodos de ensaio (ABNT, 2013) estabelece resistência característica mínima de 35 MPa. Neste caso, o concreto que mais se aproximou da resistência mínima, porém ainda assim inferior, foi o com adição de 5% de rejeito que obteve 29,06 MPa.

O desempenho obtido no experimento é justificável devido a limitação do método manual, mesa vibratória, adotado na produção dos corpos de prova, do qual segundo Simille (2010), apresenta como desvantagem a impossibilidade de produção de peças com a mesma resistência mecânica. Na prática, com o ajuste do traço e a utilização do método mecânico, possivelmente promoverá melhor adensamento dos corpos de prova e, conseqüentemente, maior resistência à compressão.

#### **6.6- Absorção de água**

Na Tabela 18 são apresentados os resultados obtidos pelo o ensaio de absorção de água por imersão, realizado com os corpos de prova dos traços de referência, 5 e 10% de rejeito.

Tabela 18– Absorção de água dos concretos aos 28 dias

Concreto	Corpo de Prova	Peso (g)		Absorção (%)	Absorção Média (%)
		Seco	Saturado		
Referência	CP1	3255,40	3470,00	6,59	6,52
	CP2	3125,00	3335,70	6,74	
	CP3	3158,80	3355,00	6,21	
5% de Rejeito	CP1	3100,10	3322,50	7,17	6,83
	CP2	3146,70	3358,80	6,74	
	CP3	3180,60	3389,40	6,56	
10% de Rejeito	CP1	3129,30	3359,70	7,36	6,84
	CP2	3186,10	3401,40	6,76	
	CP3	3179,00	3382,20	6,39	

Com base nos resultados apresentados na Tabela 18 é possível verificar que os concretos contendo adições de rejeito nas proporções de 5 e 10% obtiveram o mesmo resultado. O concreto de referência apresentou absorção ligeiramente inferior aos concretos com rejeito.

Segundo a norma NBR 9781 – Peças de concreto para pavimentação – especificação e métodos de ensaio (ABNT, 2013), é admitida a absorção média de até 6% e individual menor que 7%. Neste caso, dos resultados obtidos todos os concretos apresentaram uma absorção ligeiramente superior ao limite especificado, porém, dos corpos de prova ensaiados apenas dois excederam o limite de 7%, o CP1 contendo 5% de rejeito e o CP2 contendo 10% de rejeito. O resultado obtido pode ser também melhorado no processo de moldagem por prensagem dos corpos de prova, conforme citado no item 6.5.

### 6.7- Desgaste à abrasão

As Tabelas 19 a 21 apresentam os resultados obtidos no ensaio de desgaste à abrasão, referente às amostras dos concretos de referência, 5 e 10% de rejeito, na idade de 35 dias.

Tabela 19– Desgaste à abrasão do concreto de referência aos 35 dias

Corpo de Prova		Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Nº de Voltas	Espessura Média (mm)	Desgaste (mm)	Desgaste Parcial 250 Voltas (mm)		Desgaste Total 500 Voltas (mm)	
CP 1	A	2,121	0	25,78	0,00	3,12	2,73	5,44	5,31
			250	23,06	2,71				
			500	21,03	4,75				
	B	2,060	0	29,03	0,00				
			250	25,50	3,53				
			500	22,90	6,13				
CP 2	A	1,973	0	29,70	0,00	2,15	2,73	3,80	5,31
			250	28,43	1,28				
			500	27,00	2,70				
	B	2,075	0	27,55	0,00				
			250	24,53	3,03				
			500	22,65	4,90				
CP3	A	2,069	0	29,08	0,00	2,93	2,73	6,70	5,31
			250	26,80	2,28				
			500	23,10	5,98				
	B	2,300	0	26,18	0,00				
			250	22,60	3,58				
			500	18,75	7,43				

Tabela 20 – Desgaste à abrasão do concreto com 5% de rejeito aos 35 dias

Corpo de Prova		Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Nº de Voltas	Espessura Média (mm)	Desgaste (mm)	Desgaste Parcial 250 Voltas (mm)		Desgaste Total 500 Voltas (mm)	
CP 1	A	2,124	0	25,18	0,00	3,09	2,79	5,91	5,91
			250	21,74	3,44				
			500	18,43	6,75				
	B	2,030	0	29,40	0,00				
250			26,65	2,75					
500			24,33	5,08					
CP 2	A	2,117	0	25,38	0,00	2,89	2,79	5,83	5,91
			250	22,08	3,30				
			500	18,65	6,73				
	B	2,051	0	30,35	0,00				
250			27,86	2,49					
500			25,43	4,93					
CP 3	A	2,066	0	27,65	0,00	2,38		5,99	
			250	24,40	3,25				
			500	21,64	6,01				
	B	2,135	0	28,10	0,00				
250			26,59	1,51					
500			22,13	5,98					

Tabela 21 – Desgaste à abrasão do concreto com 10% de rejeito aos 35 dias

Corpo de Prova		Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Nº de Voltas	Espessura Média (mm)	Desgaste (mm)	Desgaste Parcial 250 Voltas (mm)		Desgaste Total 500 Voltas (mm)	
CP 1	A	1,938	0	30,23	0,00	3,11	2,86	6,22	5,78
			250	26,26	3,96				
			500	22,55	7,68				
	B	2,045	0	25,58	0,00				
250			23,33	2,25					
500			20,81	4,76					
CP 2	A	1,940	0	29,28	0,00	2,69	2,86	5,10	5,78
			250	26,59	2,69				
			500	24,18	5,10				
	B*	1,647	0	28,58	0,00				
250			19,40	9,18					
500			16,45	12,13					
CP3	A	2,111	0	28,30	0,00	2,79	2,86	6,01	5,78
			250	24,85	3,45				
			500	22,09	6,21				
	B	2,189	0	25,93	0,00				
250			23,80	2,13					
500			20,13	5,80					

\* O resultado do CP 2 B não foi considerado no cálculo do desgaste parcial e total.

Analisando os resultados apresentados nas Tabelas 19 a 21 verifica-se que os concretos contendo adições de rejeito de minério de ferro *pellet feed* apresentaram um desgaste ligeiramente superior ao de referência. O concreto contendo 10% de rejeito, após as 250 voltas, equivalente a 500 m, apresentou um desgaste superior aos de referência, em 4,7%. Após as 500 voltas, equivalente a 1000 m, o desgaste tornou-se um pouco mais expressivo, ficando 9% superior ao de referência.

Já o concreto contendo 5% de rejeito, nas primeiras 250 voltas, apresentou um desgaste inferior ao de 10%, porém, superior ao de referência, apresentando um aumento de 2%. Após as 500 voltas, o concreto contendo 5% de rejeito apresentou um desgaste superior aos demais concretos, sendo este 11% em relação ao concreto de referência.

Do ponto de vista normativo, a norma NBR 9781 – Peças de concreto para pavimentação – especificação e métodos de ensaio (ABNT, 2013), considera aceitável cavidade máxima de até 23 mm. Porém, o limite normativo apresentado não é parâmetro comparativo para os resultados obtidos no experimento, tendo em vista que o ensaio realizado foi uma adaptação da norma NBR 12042 – Materiais inorgânicos – determinação do desgaste por abrasão (ABNT, 1992), devido a indisponibilidade do equipamento especificado na norma NBR 9781 (ABNT, 2013).

Analisando os resultados dos corpos de prova, destaca-se o CP 2 B contendo 10% de rejeito, por ter apresentado menor desempenho (12,13 mm de desgaste) entre todos os corpos de prova ensaiados. Além de apresentar menor desempenho, o CP 2 B apresentou a menor densidade (1,647 g/cm<sup>3</sup>). Dando a entender que possivelmente ocorreu alguma falha durante o adensamento do corpo de prova, e conseqüentemente, o mesmo se tornou menos denso e mais susceptível ao desgaste à abrasão. Desta forma, os resultados do CP 2 B foram desconsiderados do cálculo de desgaste parcial e total.

## 7- CONCLUSÕES

A caracterização física do rejeito de minério de ferro *pellet feed* apresentou composição granulométrica equivalente ao *filler*, ou seja, em sua maioria (57,52%) abaixo de 75  $\mu\text{m}$  e massa específica ( $2,72 \text{ g/cm}^3$ ) próxima ao do agregado calcáreo ( $2,69 \text{ g/cm}^3$ ) utilizado no experimento.

Em geral, o rejeito bruto é composto por quartzo -  $\text{SiO}_2$ , a hematita -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e a caulinita -  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ . A hematita e o quartzo representam 94,36% da amostra, sendo o quartzo em maior proporção, com 68%. Segundo a caracterização ambiental o rejeito bruto é classificado como um resíduo não perigoso - classe II A, não inerte.

Ao submeter o rejeito bruto ao beneficiamento por separação magnética foi removido 21% de massa magnética, constituindo-se basicamente por hematita. Após o beneficiamento foram introduzidas novas amostras para a caracterização, sendo estas: o não magnético do LIMS, o magnético e o não magnético do WHIMS. Das amostras obtidas após o beneficiamento destacou-se o não magnético do WHIMS que apresentou uma maior concentração de quartzo (84,66%) e conseqüentemente menor concentração de hematita (9,34%). Já a amostra não-magnética do LIMS apresentou as mesmas características do rejeito bruto, demonstrando ineficiência no processo de separação magnética de baixa intensidade.

Segundo os resultados obtidos, a amostra mais adequada para aplicação como *filler* no experimento seria o não magnético do WHIMS, o qual apresentou uma maior concentração de quartzo. Entretanto, optou-se pela aplicação do rejeito bruto, por se tratar da condição real de geração da mineradora.

Para o estudo de aplicação do rejeito em concreto intertravado foram avaliados três concretos, um de referência e dois contendo adições de rejeito bruto nas proporções de 5 e 10% da massa de cimento. Após moldagem e cura dos corpos de prova, os mesmos foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão, absorção de água e resistência à abrasão.

Do ponto de vista normativo, os concretos ensaiados obtiveram desempenho inferior ao exigido pela norma NBR 9781 – Peças de concreto para pavimentação – especificação e métodos de ensaio (ABNT, 2013). A norma NBR 9781 estabelece como resistência característica estimada mínima de 35 MPa, absorção média de água menor ou igual a 6% e cavidade máxima por desgaste à abrasão de até 23 mm.

Dos concretos ensaiados o que mais se aproximou da resistência mínima foi o com 5% de rejeito, atingindo 29,06 MPa, enquanto que a absorção média de água mais próxima da norma foi obtida pelo concreto de referência, com 6,52%. Os resultados obtidos no ensaio de desgaste à abrasão não são passivos de comparação com a presente norma, visto que o ensaio realizado foi uma adaptação do método. O ensaio foi adaptado seguindo a norma a NBR 12042 – Materiais inorgânicos – determinação do desgaste por abrasão (ABNT, 1992).

Tendo em vista o não atendimento da NBR 9781, na prática, o devido ajuste do traço de concreto a ser usado na fábrica, utilizando-se sistema de prensagem, possivelmente promoverá melhor adensamento dos corpos de prova e, conseqüentemente, melhor desempenho. Nessa pesquisa, buscou-se uma análise comparativa de resultados obtidos para o concreto de referência e para os concretos com adição de rejeito.

Na análise comparativa entre o concreto com 5% de rejeito e o concreto de referência, nota-se que o concreto contendo o rejeito apresentou resistência característica estimada superior em 6,6%, absorção média de água superior em 5% e desgaste à abrasão total superior em 11%. Comparando os resultados de referência com os resultados do concreto com 10% de rejeito, verifica-se que o concreto contendo o rejeito apresentou resistência característica estimada superior em 3%, absorção média de água em 5% e desgaste à abrasão total superior em 9%.

Apesar do menor desempenho nos ensaios de absorção de água e de desgaste à abrasão, a adição do rejeito como um material *filler* mostrou-se ser uma alternativa

viável, visto que a sua adição no concreto acarretou melhorias no comportamento mecânico do concreto em seu estado endurecido.

## 8- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir apresentam-se algumas propostas para trabalhos futuros, que poderiam ser desenvolvidos para complementar e dar continuidade à presente pesquisa, bem como serviriam para ampliar e refinar o entendimento sobre o desempenho de peças pré-moldadas de concreto para pavimentação intertravada com adição de rejeito de minério de ferro *pellet feed*:

- Utilizar a fração não magnética do rejeito, uma vez que o método WHIMS mostrou-se eficiente no processo de beneficiamento do rejeito;
- Estudar a dosagem do concreto, visando obter um traço com teor ótimo de adição de rejeito de minério de ferro *pellet feed* e que atenda o desempenho especificado na norma NBR 9781 (ABNT, 2013);
- Avaliar o comportamento do rejeito em escala de produção de peças pré-moldadas de concreto na fábrica, utilizando a mistura do rejeito com o pó de pedra;
- Realizar ensaios de resistência à abrasão seguindo o método especificado na norma NBR 9781 (ABNT, 2013);
- Realizar ensaios de módulo elasticidade;
- Executar um trecho experimental de pavimento intertravado com peças pré-moldadas produzidas com adição de rejeito de minério de ferro *pellet feed*, com intuito de realizar monitoramento da resistência e durabilidade das peças, em condições reais de uso.

## REFERÊNCIAS

ARAUJO, Cecília B. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2006. 133 p. Dissertação de mestrado (Programa de Pós Graduação de Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

ARY JÚNIOR, I. J. **Pavimento intertravado como ferramenta de moderação do tráfego nos centros comerciais de travessias urbanas: estudo de caso Guaiúba**. Fortaleza: UFC, 2007. 208 p. Dissertação de mestrado (Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transporte) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733: Cimento Portland com alta resistência inicial**. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 9781: Peças de concreto para pavimentação – especificação e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 10004: Resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 10005: Lixiviação de resíduos**. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 10006: Solubilização de resíduos**. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 10007: Amostragem de resíduos**. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 11578: Cimento Portland composto**. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 12042: Materiais inorgânicos – determinação do desgaste por abrasão**. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 12307: Regularização do subleito**. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 12653: Materiais pozolânicos**. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 15953: Pavimento intertravado com peças de concreto - execução**. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 27 – Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório**. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52 – Agregados miúdo – determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53 – Agregados graúdo – determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248 – Agregados – determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

BERTOCINI, Sandra R.; ARISTIMUNHO, Peterson B. Aplicação de lama de minério de ferro em forma de pó na presença de cimento Portland. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 5, n. 2, p. 153-165, abr. 2012.

CHAVES, Arthur P.; MASINI, Eldon A.; CHIAPPA, Ricardo; OLIVEIRA, Antônio H.; CORDEIRO, Ricardo A. C.; GANIME, José F.; GUIMARÃES, Rogério C.; FERNANDES, Cláudio. **Espessamento.** In: Teoria e prática do tratamento de minérios: desaguamento, espessamento e filtragem. 3. ed. São Paulo: Signus Editora, 2010. v. 2, cap. 2, p. 50-148.

CHAVES, Arthur P. **Disposição de rejeitos.** In: Teoria e prática do tratamento de minérios: manuseio de sólidos granulados. 1. ed. São Paulo: Signus Editora, 2011. v. 5, cap. 8, p. 339-355.

CHAVES, Arthur P.; PERES, Antônio E. C. **Teoria e prática do tratamento de minérios:** britagem, peneiramento e moagem. 4. ed. São Paulo: Signus Editora, 2009. v. 3, 258 p.

CORREIA, Julio C. G. **Classificação e peneiramento.** In: Tratamento de minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 6, p. 257-296.

COSTA, Ayrton V. **Utilização do rejeito de *sinterfeed* como agregado na produção de peças de concreto para pavimentação.** Belo Horizonte: UFMG, 2009. 138 p. Dissertação de mestrado (Programa de Pós Graduação em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

CRUZ, L. O. M. **Pavimento intertravado de concreto:** estudo dos elementos e métodos de dimensionamento. Rio de Janeiro: UFRJ, 2003. 281 p. Dissertação de mestrado (Programa de Pós Graduação de Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

DAL MOLIN, Denise C. C. **Adições minerais para concreto estrutural.** In: Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. cap. 12, p. 347.

FEAM, Fundação Estadual de Meio Ambiente. **Inventário de resíduos sólidos da mineração:** ano base 2013. Disponível em: < <http://www.feam.br/> >. Acessado em: 07 fev. 2015.

FIGUEIRA, Hedda V. O.; LUZ, Adão B.; ALMEIDA, Salvador L. M. **Britagem e moagem**. In: Tratamento de minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 4, p. 143-210.

FRANÇA, Silvia C. A.; MASSARANI, Giulio. **Separação sólido-líquido**. In: Tratamento de minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 15, p. 637-678.

FUNDAÇÃO DE TECNOLOGIA DO ESTADO DO ACRE (FUNTAC). **Relatório Técnico**: setor cerâmico do Vale do Acre. Rio Branco, 1999.

GODINHO, D. P. **Pavimento intertravado: uma reflexão sob a ótica da durabilidade e sustentabilidade**. Belo Horizonte: UFMG, 2009. 157 p. Dissertação de mestrado (Programa de Pós Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

HALLACK, A. Pavimento intertravado: uma solução universal. **Revista Prisma**, São Paulo, p. 25-27, dez. 2001.

HUANG, X.; RAVI, R.; NI, W.; LI, V. C. Development of green engineered cementitious composites using iron ore tailings as aggregates. **Construction and Building Materials**, Philadelphia, v. 44, p. 747-764, 2013.

IBRAM, Instituto Brasileiro de Mineração. **Informações e análises da economia mineral brasileira**: ano base 2012. Disponível em: < <http://www.ibram.org.br/> >. Acessado em: 07 fev. 2015.

Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Orientações sobre validação de métodos de ensaios químicos**. Rio de Janeiro, 2003. p. 35.

INTERLOCKING CONCRETE PAVEMENT INSTITUTE (ICPI). **Structural design of interlocking concrete pavement for roads and parking lots**. Washington, 2003. Disponível em: <<http://www.icpi.org>>. Acesso em: 14 fev. 2015. (Tech Spec, n. 4).

JESUS, Carlos A. G. **Economia mineral do Brasil**. Belo Horizonte: DNPM, 2009. Disponível em:< <https://sistemas.dnpm.gov.br/> >. Acessado em: 30 out. 2011.

KIHARA, Y.; CENTURIONE, S. L. **O Cimento Portland**. In: Concreto: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. cap. 10, p. 295-322.

KNAPTON, J. **Romans and their roads**: the original small element pavement technologists. INTERNATIONAL CONCRETE BLOCK PAVING CONFERENCE, 5., 1996, Tel-Aviv, Israel. Proceedings... Tel-Aviv, Israel: [s.n.], june 1996. p. 17-52.

KNAPTON, J.; COOK, I. D. **Design methods for clay and concrete block paving**. Auckland: [s.n.], 1992. vol. 2.

KOVLER, K. Three dilemmas in sustainability of construction materials and technologies. In: Second International Conference on Sustainable Construction

Materials and Technologies., 2010, Ancona. **Honor Sessions Proceedings ...** Milwaukee: UWM Center, 2010 p. 179-189.

LI, C.; SUN, H.; BAI, J.; LI, L. Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings Part 1. The recovery of iron from iron ore tailings using magnetic separation after magnetizing roasting. **Journal of Hazardous Materials**, Philadelphia, v. 174, p. 71-77, fev. 2010.

LINS, Fernando A. F. **Concentração gravítica**. In: Tratamento de minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 7, p. 301-325.

LUZ, Adão B.; LINS, Fernando A. F. **Introdução ao tratamento de minério**. In: Tratamento de minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 1, p. 3-18.

MONTE, Marisa B. M.; PERES, Antônio E. C. **Química de superfície na flotação**. In: Tratamento de minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 10, p. 399-457.

NASCIMENTO, R. R. **Utilização de argila calcinada em pavimentação: uma alternativa para o estado do Acre**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2005. 171 p. Dissertação de mestrado (Programa de Pós Graduação de Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete**. 4. Ed. Edition Longman Group Limited, 1995. 844 p.

NOCITI, Denyse M. **Aproveitamento de rejeitos oriundos da extração de minério de ferro na fabricação de cerâmicas vermelhas**. Guaratinguetá: UNESP, 2011. 110 p. Dissertação de mestrado (Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

PAL, A.; SAMANTA, A. N.; RAY, S. Treatment of iron ore slime for value addition. **Hydrometallurgy**, Philadelphia, v. 105, p. 30-35, 2010.

PEREIRA, Eleonardo L. **Estudo do potencial de liquefação de rejeito de minério de ferro sob carregamento estático**. Ouro Preto: UFOP, 2005. 185 p. Dissertação de mestrado (Programa de Pós Graduação do Departamento de Construção Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

PRESOTTI, Ednelson S. **Influência do teor de ferro nos parâmetros de resistência de um rejeito de minério de ferro**. Ouro Preto: UFOP, 2002. 109 p. Dissertação de mestrado (Programa de Pós Graduação do Departamento de Construção Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2002.

ROCHA, L.; PERES, A. E. C. Aproveitamento econômico das lamas de ferro. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 62, p. 291-295, jul. – set. 2009.

SAMPAIO, João A.; LUZ, Adão B.; FRANÇA, Silvia C. A. **Separação magnética e eletrostática**. In: Tratamento de minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 9, p. 367-393.

SILVA, Narciso G.; BUEST, Guilherme; CAPITELI, Vicente C. **A influência do filler de areia britada de rocha calcária nas propriedades da argamassa de revestimento**. Disponível em: < <http://pessoal.utfpr.edu.br/> >. Acessado em: 23 jul. 2013.

SILVA, Rodolfo G. O. **Estudo laboratorial do desempenho mecânico de misturas asfálticas com resíduos industriais de minério de ferro**. Ouro Preto: UFOP, 2010. 132 p. Dissertação de mestrado (Programa de Pós Graduação em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

SHACKEL, B. **Design and construction of interlocking concrete block pavement**. 5. ed. New York: Elsevier, 1990.

SIMIELE, D. **Aproveitamento de resíduos de concreto na confecção de peças para pavimento intertravado de concreto**. Ilha Solteira: UNESP, 2010. 119 p. Dissertação de mestrado (Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2010.

SOUZA, C. C.; VIEIRA, C. M. F; MONTEIRO, S. N. Alterações microestruturais de cerâmica argilosa incorporada com rejeito de minério de ferro. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 1, p. 194-202, 2008.

WOLFF, Ana P. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da Vale**. Ouro Preto: UFOP, 2009. 90 p. Dissertação de mestrado (Programa de Pós Graduação do Departamento de Engenharia de Mina) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

THOMPSON, M.; ELLISON, S.L.R.; WOOD, R. Harmonized guidelines for singles laboratory validation of methods of analysis. **Pure Appl. Chem.**, v. 74, p. 835-855, 2002.

YI, Z.; SUN, H.; WEI, X.; LI, C. Iron ore tailings used for the preparation of cementitious material by compound thermal activation. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, Philadelphia, v. 16, n. 3, p. 355-358, jun. 2009.

**ANEXOS**

**ANEXO 1- LAUDO DE ANÁLISE DE CLASSIFICAÇÃO DO REJEITO DE  
MINÉRIO DE FERRO *PELLET FEED***



RELATÓRIO DE ANÁLISE Nº 24583IN
---------------------------------

DADOS DE REFERÊNCIA DO CLIENTE	
Cliente:	Anglo American
Endereço:	Rua Raul Soares, 159 - Centro - MG
Código do Projeto:	-

DADOS DE REFERÊNCIA DA AMOSTRA			
Temperatura de Recebimento (Faixa):	de 17,0 °C	Data de amostragem	-
Responsável pela coleta:	INTERESSADO	Data de Emissão do Relatório:	19/11/2013
Data de recebimento da amostra:	13/9/2013	Data de Reemissão do Relatório:	8/5/2014

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA	
Referência Analytical Solutions	Referência do Cliente
24583IN001	REJEITO MINÉRIO DE FERRO - RESÍDUO
24583IN002	REJEITO MINÉRIO DE FERRO - LÍQUIDA
24583IN003	REJEITO MINÉRIO DE FERRO - LÍQUIDA

Versão do Laudo: 2

**Laboratório responsável direto pela análise: Analytical Solutions Ltda**

Alameda África, 685, Galpão 01 Pólo Industrial de Tamboré - Santana de Parnaíba, SP 06543-306

Laboratório de Ensaio acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CRL 0241



CÓDIGO DO PROJETO:  
 Versão do Laudo: 2  
**RESULTADOS ANALÍTICOS DA AMOSTRA 24583IN001 - REJEITO MINÉRIO DE FERRO - RESÍDUO**

10004: 2004 Massa Bruta

PARAMETROS	UNIDADE	LD	LQ	RESULTADOS	VMP
Corrosividade	N.A.	N.A.	N.A.	Não Corrosivo	N.A.
Inflamabilidade	N.A.	N.A.	N.A.	Não Inflamável	N.A.
Reatividade	N.A.	N.A.	N.A.	Não Reativo	N.A.
pH	N.A.	N.A.	N.A.	7,90	2 a 12,5
Cianetos	(mg/Kg)	0,010	0,050	N.D.	250
Sulfetos	(mg/Kg)	0,020	0,050	N.D.	500

Fator de Diluição: 1

Umidade (%): N/A

#### Observações:

N.D. = Não Detectado acima do Limite de Quantificação.

L.D. = Limite de Detecção

L.Q. = Limite de Quantificação.

N.A. = Não Aplicável.

#### Data de Realização das análises:

#### Preparação:

NBR 10004: 2004 Massa Bruta Inorg Reatividade - 14-09-2013

NBR 10004: 2004 Massa Bruta Inorg Corrosividade - 14-09-2013

NBR 10004: 2004 Massa Bruta Inorg Inflamabilidade - 14-09-2013

NBR 10004: 2004 Massa Inorgânicos pH -14-09-2013

NBR 10004: 2004 Massa Inorgânicos Cianetos - 14-09-2013

NBR 10004: 2004 Massa Inorgânicos Sulfetos -14-09-2013

#### Análise:

NBR 10004: 2004 Massa Bruta Inorg Reatividade - 14-09-2013

NBR 10004: 2004 Massa Bruta Inorg Corrosividade - 14-09-2013

NBR 10004: 2004 Massa Bruta Inorg Inflamabilidade - 14-09-2013

NBR 10004: 2004 Massa Inorgânicos pH -14-09-2013

NBR 10004: 2004 Massa Inorgânicos Cianetos - 14-09-2013

NBR 10004: 2004 Massa Inorgânicos Sulfetos -14-09-2013



CÓDIGO DO PROJETO:  
 Versão do Laudo: 2  
 RESULTADOS ANALÍTICOS DA AMOSTRA 24583IN002 - REJEITO MINÉRIO DE FERRO - LIQUIDA

NBR 10004: 2004 Lixiviado Inorgânicos

PARAMETROS	UNIDADE	LD	LQ	RESULTADOS	VMP
Fluoretos	(mg/L)	0,01	0,05	0,36	150
Arsênio	(mg/L)	0,002	0,005	N.D.	1
Bário	(mg/L)	0,002	0,010	0,103	70
Cádmio	(mg/L)	0,0003	0,0010	N.D.	0,5
Chumbo	(mg/L)	0,002	0,010	N.D.	1
Cromo Total	(mg/L)	0,005	0,010	N.D.	5
Mercúrio	(mg/L)	0,0002	0,0010	N.D.	0,1
Prata	(mg/L)	0,005	0,010	N.D.	5
Selênio	(mg/L)	0,001	0,005	N.D.	1
Aldrin	(mg/L)	0,000005	0,000030	N.D.	0,003
Benzo[a]pireno	(mg/L)	0,00005	0,00020	N.D.	0,07
Clordano (isômeros)	(mg/L)	0,000005	0,000030	N.D.	0,02
Cresóis	(mg/L)	0,00005	0,00020	N.D.	200
Dieldrin	(mg/L)	0,000005	0,000030	N.D.	0,003
Endrin	(mg/L)	0,000005	0,000030	N.D.	0,06
Epoxy Heptachlor	(mg/L)	0,000005	0,000030	N.D.	0,003
Gama-BHC (Lindano)	(mg/L)	0,000005	0,000030	N.D.	0,2
Heptachlor	(mg/L)	0,000005	0,000030	N.D.	0,003
Hexaclorobenzeno	(mg/L)	0,000005	0,000030	N.D.	0,1
Hexaclorobutadieno	(mg/L)	0,00005	0,00020	N.D.	0,5
Hexacloroetano	(mg/L)	0,000005	0,000030	N.D.	3
m-Cresol	(mg/L)	0,00005	0,00020	N.D.	200
Metoxichlor	(mg/L)	0,00005	0,00020	N.D.	2
Nitrobenzeno	(mg/L)	0,00005	0,00020	N.D.	2
o-Cresol	(mg/L)	0,00005	0,00020	N.D.	200
p-Cresol	(mg/L)	0,00005	0,00020	N.D.	200
Pentaclorofenol	(mg/L)	0,00005	0,00020	N.D.	0,9
Toxafeno	(mg/L)	0,00005	0,00020	N.D.	0,5
2,4-Dinitrotolueno	(mg/L)	0,00005	0,00020	N.D.	0,13
2,4,5-Triclorofenol	(mg/L)	0,00005	0,00020	N.D.	400
2,4,6-Triclorofenol	(mg/L)	0,00005	0,00020	N.D.	20
4,4-DDD (p,p-DDD)	(mg/L)	0,000005	0,000030	N.D.	0,2
4,4-DDE (p,p-DDE)	(mg/L)	0,000005	0,000030	N.D.	0,2
4,4-DDT (p,p-DDT)	(mg/L)	0,000005	0,000030	N.D.	0,2
Benzeno	(mg/L)	0,0001	0,0010	N.D.	0,5
Cloreto de vinila	(mg/L)	0,0001	0,0010	N.D.	0,5
Clorobenzeno	(mg/L)	0,0001	0,0010	N.D.	100
Clorofórmio	(mg/L)	0,0001	0,0010	N.D.	6
Hexaclorobutadieno	(mg/L)	0,00005	0,00020	N.D.	0,5
Hexacloroetano	(mg/L)	0,000005	0,000030	N.D.	3
Piridina	(mg/L)	0,0001	0,0010	N.D.	5
Tetracloroeto de carbono	(mg/L)	0,0001	0,0010	N.D.	0,2
Tetracloroetano	(mg/L)	0,0001	0,0010	N.D.	4



Tricloroeteno	(mg/L)	0,0001	0,0010	N.D.	7
1,1-Dicloroeteno	(mg/L)	0,0001	0,0010	N.D.	3
1,2-Dicloroetano	(mg/L)	0,0001	0,0010	N.D.	1
1,4-Diclorobenzeno	(mg/L)	0,0001	0,0010	N.D.	7,5
2-Butanona	(mg/L)	0,0001	0,0010	N.D.	200
2,4-D (Ácido 2,4-Diclorofenoxidoacético)	(mg/L)	0,001	0,005	N.D.	3
2,4,5-T (Ácido 2,4,5-Triclorofenoxidoacético)	(mg/L)	0,001	0,005	N.D.	0,2
2,4,5-TP (Ácido a-2,4,5-Triclorofenoxidopropiônico)	(mg/L)	0,001	0,005	N.D.	1

Fator de Diluição: 1  
Umidade (%): N/A

#### Observações:

N.D. = Não Detectado acima do Limite de Quantificação.  
L.D. = Limite de Detecção  
L.Q. = Limite de Quantificação.  
N.A. = Não Aplicável.  
VMP = Valores máximos permitidos

#### Data de Realização das análises:

##### Preparação:

NBR 10004: 2004 Lixiviado Inorgânicos - 17-09-2013  
NBR 10004: 2004 Lixiviado MTL Metais - 17-09-2013  
NBR 10004: 2004 Lixiviado SVOC - 17-09-2013  
NBR 10004: 2004 Lixiviado VOC - 17-09-2013  
NBR 10004:2004 Lixiviado Fenoxiacéticos LC/MS-MS - 17-09-2013

##### Análise:

NBR 10004: 2004 Lixiviado Inorgânicos - 17-09-2013  
NBR 10004: 2004 Lixiviado MTL Metais - 26-10-2013  
NBR 10004: 2004 Lixiviado SVOC - 24-10-2013  
NBR 10004: 2004 Lixiviado VOC - 02-10-2013  
NBR 10004:2004 Lixiviado Fenoxiacéticos LC/MS-MS - 06-11-2013



CÓDIGO DO PROJETO:  
 Versão do Laudo: 2  
 RESULTADOS ANALÍTICOS DA AMOSTRA 24583IN003 - REJEITO MINÉRIO DE FERRO - LIQUIDA

NBR 10004: 2004 Solubilizado Inorgânicos

PARAMETROS	UNIDADE	LD	LQ	RESULTADOS	VMP
Cloretos	(mg/L)	0,04	0,50	N.D.	250
Fluoretos	(mg/L)	0,004	0,020	N.D.	1,5
Nitratos	(mg N/L)	0,02	0,11	N.D.	10
Sulfatos	(mg/L)	0,03	0,50	N.D.	250
Cianetos	(mg/L)	0,001	0,005	N.D.	0,07
Surfactantes (MBAS ou Detergentes)	(mg/L)	0,024	0,045	N.D.	0,5
Alumínio	(mg/L)	0,010	0,050	0,930	0,2
Arsênio	(mg/L)	0,002	0,005	N.D.	0,01
Bário	(mg/L)	0,002	0,010	0,067	0,7
Cádmio	(mg/L)	0,0003	0,0010	N.D.	0,005
Chumbo	(mg/L)	0,002	0,010	N.D.	0,01
Cobre	(mg/L)	0,001	0,005	0,010	2
Cromo Total	(mg/L)	0,005	0,010	N.D.	0,05
Ferro Total	(mg/L)	0,010	0,050	1,497	0,3
Manganês	(mg/L)	0,005	0,010	0,151	0,1
Mercurio	(mg/L)	0,0002	0,0010	N.D.	0,001
Prata	(mg/L)	0,005	0,010	N.D.	0,05
Selênio	(mg/L)	0,001	0,005	N.D.	0,01
Sódio	(mg/L)	0,100	0,200	1,019	200
Zinco	(mg/L)	0,005	0,010	0,021	5
Aldrin	(mg/L)	0,000005	0,000030	N.D.	0,00003
Alfa-clordano	(mg/L)	0,000005	0,000030	N.D.	0,0002
Dieldrin	(mg/L)	0,000005	0,000030	N.D.	0,00003
Endrin	(mg/L)	0,000005	0,000030	N.D.	0,006
Epoxy Heptachlor	(mg/L)	0,000005	0,000030	N.D.	0,0003
Fenóis Totais	(mg/L)	0,00005	0,00020	N.D.	0,01
Gama-BHC (Lindano)	(mg/L)	0,000005	0,000030	N.D.	0,002
Gama-clordano	(mg/L)	0,000005	0,000030	N.D.	0,0002
Heptachlor	(mg/L)	0,000005	0,000030	N.D.	0,00003
Hexaclorobenzeno	(mg/L)	0,000005	0,000030	N.D.	0,001
Metoxichlor	(mg/L)	0,00005	0,00020	N.D.	0,02
Toxafeno	(mg/L)	0,00005	0,00020	N.D.	0,005
4,4-DDD (p,p-DDD)	(mg/L)	0,000005	0,000030	N.D.	N.A.
4,4-DDE (p,p-DDE)	(mg/L)	0,000005	0,000030	N.D.	N.A.
4,4-DDT (p,p-DDT)	(mg/L)	0,000005	0,000030	N.D.	0,002
2,4-D (Ácido 2,4-Diclorofenoxidoacético)	(mg/L)	0,001	0,005	N.D.	0,03
2,4,5-T (Ácido 2,4,5-Triclorofenoxidoacético)	(mg/L)	0,001	0,005	N.D.	0,002
2,4,5-TP (Ácido a-2,4,5-Triclorofenoxidopropiônico)	(mg/L)	0,001	0,005	N.D.	0,03



Fator de Diluição: 5  
Umidade (%): N/A

**Observações:**

N.D. = Não Detectado acima do Limite de Quantificação.  
L.D. = Limite de Detecção  
L.Q. = Limite de Quantificação.  
N.A. = Não Aplicável.  
VMP = Valores máximos permitidos

**Data de Realização das análises:**

**Preparação:**

NBR 10004: 2004 Solubilizado Inorgânicos - 23-09-2013  
NBR 10004: 2004 Solubilizado Inorgânicos Cianetos - 27-09-2013  
NBR 10004: 2004 Solubilizado Inorgânicos Surfactantes (MBAS ou Detergentes) - 23-09-2013  
NBR 10004: 2004 Solubilizado MTL Metais - 14-10-2013  
NBR 10004: 2004 Solubilizado SVOC - 23-09-2013  
NBR 10004:2004 Solubilizado Fenoxiacéticos LC/MS-MS - 23-09-2013

**Análise:**

NBR 10004: 2004 Solubilizado Inorgânicos - 23-09-2013  
NBR 10004: 2004 Solubilizado Inorgânicos Cianetos - 27-09-2013  
NBR 10004: 2004 Solubilizado Inorgânicos Surfactantes (MBAS ou Detergentes) - 23-09-2013  
NBR 10004: 2004 Solubilizado MTL Metais - 26-10-2013  
NBR 10004: 2004 Solubilizado SVOC - 24-10-2013  
NBR 10004:2004 Solubilizado Fenoxiacéticos LC/MS-MS - 06-11-2013



Todos os ensaios em branco e controles de qualidade foram efetuados e os resultados dos mesmos foram avaliados segundo os critérios preconizados pelo PS 4.22 - 01, não apresentando nenhuma informação ou característica que fosse relevante quanto à qualidade, validade e veracidade dos resultados analíticos reportados.

Os resultados obtidos têm seu valor restrito às amostras analisadas. A reprodução deste relatório só pode ser total e depende da aprovação formal deste laboratório.

As incertezas estão disponíveis em caso de solicitações adicionais.

As opiniões, interpretações e informações adicionais não fazem parte do escopo de acreditação do laboratório.

Em caso de reemissão do relatório esta versão substitui as versões anteriores.

**Plano de Amostragem:**

As amostras foram analisadas como recebidas, isentando o laboratório de qualquer responsabilidade referente aos procedimentos e dados de coleta.



### Referências Metodológicas

Análise	Método Externo	Método Interno	Local
Lixiviação segundo NBR 10005	ABNT NBR 10005:2004	PO 4.9 - 440/SP	SP
NBR 10004: 2004 Lixiviado Inorgânicos	USEPA 9056 A Feb 2007 / USEPA 300.1 . 1999	PE 4.9 - 453/CR	SP
NBR 10004: 2004 Lixiviado MTL Metais	USEPA 6010-C. 2007	PE 4.9 - 401_SP, PE 4.9 - 404_SP	SP
NBR 10004: 2004 Lixiviado SVOC	USEPA 8270D, Rev.4, February 2007	PE 4.9 - 127/RJ	SP
NBR 10004: 2004 Lixiviado VOC	USEPA 8260C, Rev.2, December-1996	PE 4.9 - 126/RJ	SP
NBR 10004: 2004 Solubilizado Inorgânicos	SM 4500 CN-C 21 ed. 2005	PE 4.9 - 400_SP	SP
NBR 10004: 2004 Solubilizado Inorgânicos Cianetos	SM 4500 CN-C 21 ed. 2005	PE 4.9 - 408_SP	SP
NBR 10004: 2004 Solubilizado Inorgânicos Surfactantes (MBAS ou Detergentes)	SM 5540 C, 21º Edição, 2005	PE 4.9 - 430/CR	SP
NBR 10004: 2004 Solubilizado MTL Metais	USEPA 6010-C. 2007	PE 4.9 - 401_SP, PE 4.9 - 404_SP	SP
NBR 10004: 2004 Solubilizado SVOC	USEPA 8270D, Rev.4, February 2007	PE 4.9 - 127/RJ	SP
NBR 10004:2004 Lixiviado Fenoxiacéticos LC/MS-MS	LC/MS-MS	a ser escrito	SP
NBR 10004:2004 Solubilizado Fenoxiacéticos LC/MS-MS	Determination of Chlorinated Acid Herbicides in Soils by Liquid Chromathography-Electrospray/Mass Spectrometry/Mass Spectrometry, by Angela Schaner and Laura Luckey, Revision 2, April 2, 2044. Montana Department of Agriculture, Laboratory Bureau, McCall Hal, Montana State University, Bozeman, MT 59717.	-	SP
Solubilização segundo NBR 10006	ABNT NBR 10006:2004	PO 4.9 - 441/SP	SP

Relatório Emitido por

Amanda Moura



RESPONSÁVEL TÉCNICO	
M.Sc. Marcelo Takata - 04254994 CRQ IV	

Opiniões, Interpretações e Informações Adicionais.
De acordo com os resultados das análises solicitadas e reportadas acima para a amostra 24583IN001, sugerimos a caracterização do resíduo, <b>Resíduo Classe II A (Não Inerte)</b>
<b>Obs.: As opiniões interpretações e informações adicionais não fazem parte do escopo do credenciamento do laboratório listado no quadro de credenciamento</b>

**ANEXO 2- CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND UTILIZADO NA  
PESQUISA**

## Certificado de ensaios em cimento

### CP V-ARI MAX

Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

Julho 2014

### ABNT NBR 5733/91



Companhia Nacional de Cimento  
BR 040, km 474 - Zona Rural  
Sete Lagoas, MG - CEP 35.701-970  
www.cimentonacional.com.br  
tecnico@brennandcimentos.com.br

#### Ensaio Químicos

ENSAIOS	METODOLOGIA	UN.	RESULTADO	EXIGÊNCIAS
Resíduo Insolúvel - RI	ABNT NM 15/12	%	0,72	≤ 1,0
Perda ao Fogo - PF	ABNT NM 18/12	%	3,70	≤ 4,5
Óxido de Magnésio - MgO	ABNT NM 21/12	%	1,33	≤ 6,5
Trióxido de Enxofre - SO <sub>3</sub>	ABNT NM 16/12	%	2,64	≤ 4,5
Anidrido Carbônico - CO <sub>2</sub>	ABNT NM 20/12	%	2,50	≤ 3,0

#### Ensaio Físicos

ENSAIOS	METODOLOGIA	UN.	RESULTADO	EXIGÊNCIAS
Área Específica (Blaine)	ABNT NM 76/98	cm <sup>2</sup> /g	4.623	≥ 3.000
Massa Específica	ABNT NM 23/01	g/cm <sup>3</sup>	3,06	não aplicável
Índice de finura - # 75 µm (nº 200)	ABNT NBR 11579/13	%	0,01	≤ 6,0
Resíduo na peneira #325	ABNT NBR 9202/85	%	0,30	não aplicável
Água de consistência normal	ABNT NM 43/03	%	31,6	não aplicável
Início de pega	ABNT NM 65/03	minutos	127	≥ 60
Fim de pega	ABNT NM 65/03	minutos	187	≤ 600
Expansibilidade à quente	ABNT NBR 11582/12	mm	0,00	≤ 5,0

#### Ensaio Mecânicos

ENSAIOS - ABNT NBR 7215/96	UN.	DESVIO PAD	RESULTADO	EXIGÊNCIAS
Resistência à Compressão - 1 Dia	MPa	1,39	30,6	14,0
Resistência à Compressão - 3 Dias	MPa	1,54	44,4	24,0
Resistência à Compressão - 7 Dias	MPa	1,42	50,1	34,0
Resistência à Compressão - 28 Dias	MPa	1,83	58,5	não aplicável

#### Observações

Atualização: quinta-feira, 4 de setembro de 2014

Tiago Andrade Couto  
Coordenador de Produtos e Assessoria Técnica

**ANEXO 3- FICHA TÉCNICA DO ADITIVO UTILIZADO NA PESQUISA**



The Chemical Company

## RHEOMIX® 610

Aditivo plastificante para artefatos de concreto

### DESCRIÇÃO DO PRODUTO

RHEOMIX® 610 é um aditivo líquido, livre de cloretos, para fabricação de artefatos de concreto (blocos, pavers, etc.) com características de plastificante e redutor de água, que permite maior trabalhabilidade e durabilidade.

RHEOMIX® 610 atende requisitos da NBR 11768 (tipo P) e ASTM C494(tipo A).

RHEOMIX® 610 é compatível com diversos tipos de cimento portland.

### PROPRIEDADES E BENEFÍCIOS

RHEOMIX® 610 apresenta as seguintes propriedades e benefícios:

Estado Fresco	Estado Endurecido
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Melhora o acabamento e o deslizamento na desforma;</li> <li>- Reduz o desgaste das fôrmas e moldes pela melhor lubrificação da massa.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Melhora consideravelmente a textura aparente dos blocos de concreto;</li> <li>- Aumenta a resistência dos blocos de concreto;</li> <li>- Reduz a fissuração;</li> <li>- Reduz a permeabilidade;</li> <li>- Diminui a quebra de blocos durante a fabricação;</li> <li>- Possibilita redução dos custos de produção.</li> </ul>

### CAMPOS DE APLICAÇÃO

RHEOMIX® 610 é recomendado para uso em:

Concreto seco em geral.

### Modo de Utilização / Aplicação

#### APLICAÇÃO:

RHEOMIX® 610 deve ser adicionado à água de amassamento que será utilizada na mistura dos componentes do concreto, (cimento portland, agregados, etc.). Nunca deve ser adicionado aos componentes secos do concreto.

#### DOSAGEM

RHEOMIX® 610 deve ser utilizado nas dosagens de 0,1 a 0,3% s.p.c\*. Para 50 kg de cimento portland deve-se utilizar de 50 a 150 ml de RHEOMIX® 610.

Estas dosagens são orientativas, sendo imprescindível a realização de testes laboratoriais e/ou de campo. A dosagem ótima de RHEOMIX® 610 pode variar de acordo com o tipo de cimento, quantidade de finos na mistura, fator A/C\*\*, condições de mistura, tipos de agregados, etc.

#### OBSERVAÇÕES

RHEOMIX® 610 é compatível com outros aditivos utilizados na fabricação de concretos.

Para dosagens fora da faixa recomendada e para mais informações entrar em contato com nosso departamento técnico.

A limpeza dos equipamentos e ferramentas que foram sujos com RHEOMIX® 610 deve ser feita com água abundante.



The Chemical Company

**DADOS TÉCNICOS**

Função	Plastificante		
Base Química	Surfactantes		
Aspecto	Líquido		
Cor	Alaranjado		
Solubilidade com água: Total			
Não contém cloreto de cálcio, intencionalmente adicionado, ou ingredientes a base de cloreto.			
Teste	Método BASF	Especificação	Unidade
Aparência	TM 761B	Líquido alaranjado	Visual
pH (23°C)	TM 112B	10 - 14	-
Densidade (23°C)	TM 578B	1,010 - 1,050	g/cm <sup>3</sup>
Sólidos	TM 613B	15 - 19	%
Viscosidade (23°C)	TM 117B	200 - 400	cps

**EMBALAGEM E ARMAZENAGEM**

Embalagem	RHEOMIX® 610 é fornecido em embalagens de 5,0 kg, 25 kg, 200 kg e caminhão tanque.
Validade	12 meses a partir da data de fabricação, quando respeitados as condições de armazenagem
Armazenagem	Em condições ambientais adequadas e devidamente embalado. Local coberto, fresco, seco, longe de temperaturas extremas ou fontes de calor, nas embalagens originais e lacradas. Armazenar longe do alcance de crianças.

**TRANSPORTE E SEGURANÇA**

Transporte	RHEOMIX® 610 não é classificado como um produto de transporte perigoso.
Manuseio	Utilizar EPI's adequados: luvas e botas impermeáveis, óculos de segurança química. Evitar contato com a pele e olhos; o contato prolongado com a pele pode causar dermatites. Não beber, comer ou fumar durante o manuseio; lavar as mãos antes de uma pausa ou depois do trabalho
Fogo	Produto não inflamável e não explosivo.
Toxidade	Produto não considerado tóxico, porém impróprio para o consumo humano.
Segurança	Para mais detalhes, consultar a Ficha de Segurança do produto

**Informações Complementares****Legenda:**

s.p.c\* - sobre o peso de cimento.

fator A/C\*\* - relação entre água e cimento.