

TALES MOREIRA DE OLIVEIRA

**CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS DE REJEITOS DE MINÉRIO
DE FERRO MELHORADAS COM ADIÇÃO DE CIMENTO COM
VISTAS À APLICAÇÃO EM ESTRADAS E ATERROS**

**Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, para obtenção do
título de *Magister Scientiae*.**

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2013**

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

O48c
2013

Oliveira, Tales Moreira de, 2013-

Caracterização de misturas de rejeitos de minério de ferro melhoradas com adição de cimento com vistas à aplicação em estradas e aterros / Tales Moreira de Oliveira. – Viçosa, MG, 2013.

xv, 71f. ; 29 cm.

Orientador: Cláudio Henrique de Carvalho Silva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Resíduos como material de construção. 2. Minérios de ferro. 3. Pavimentos. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 624.18

TALES MOREIRA DE OLIVEIRA

**CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS DE REJEITOS DE MINÉRIO
DE FERRO MELHORADAS COM ADIÇÃO DE CIMENTO COM
VISTAS À APLICAÇÃO EM ESTRADAS E ATERROS**

**Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, para obtenção do
título de *Magister Scientiae*.**

APROVADA: 26 de julho de 2013.

Prof. Heraldo Nunes Pitanga
(Examinador externo)

Prof. Carlos Alexandre Braz de Carvalho
(Coorientador)

Prof. Claudio Henrique de Carvalho Silva
(Orientador)

Ao milagre vivo do amor, revestido de carne e osso, com alma e coração, singelo e doce, fecundado pelo reflexo de Deus e nascido do ventre materno, constituindo-se em vida plena, ou simplesmente meus filhos e sua mãe, aqueles a quem meu amor será sempre água viva na fonte. (Maria Eduarda, Felipe e Carine), **DEDICO.**

AGRADECIMENTOS

Ao Senhor Deus, ser supremo, a quem solicito o caminhar da vida na luz, e agradeço pelo fortalecimento diário da minha essência diante dos desafios a que a vida me impõe.

Ao meu saudoso pai, que cumpriu a perfeita tarefa de me formar como homem, dando-me um impagável caráter humano, além dos inúmeros aprendizados deixados e que me faz ser diferente.

A minha mãe e meu irmão, família que me ama, me ajuda, ampara e me sustenta.

Ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Viçosa (DEC/UFV), pela disponibilização da infraestrutura necessária à realização desta pesquisa.

Ao professor Claudio Henrique de Carvalho Silva, pela orientação, convívio, apoio e ensinamentos.

Ao professor Taciano Oliveira da Silva, pela refinada e valiosa sugestão, críticas e apoio durante a realização deste trabalho.

Aos professores Dario Cardoso de Lima e Carlos Alexandre de Carvalho, pela coorientação, pelo ensino, amizade e exemplo singular de vida acadêmica.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro concedido ao longo deste trabalho.

A todos que escutaram de minha pessoa a palavra ‘mestrado’ e aqueles que contribuíram de forma direta ou indireta para esta concretização.

BIOGRAFIA

TALES MOREIRA DE OLIVEIRA, filho de José Raimundo de Oliveira e Maria Amélia Moreira de Oliveira, nasceu em 03 de agosto de 1983, na cidade de São Paulo – SP.

Em março de 2004, iniciou o curso de Engenharia Civil, na Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa-MG, graduando-se em janeiro de 2009, onde foi bolsista de iniciação científica da Fapemig em pesquisas relacionadas a estradas florestais, durante 4 anos do curso.

Em janeiro de 2009, iniciou o exercício da profissão, passando pelas empresas Topocart, Planex S/A e Copener / Bahia Specialty Cellulose, quando então ocupou o cargo de Coordenador de Infraestrutura e Estradas.

Visando capacitação, retornou a vida acadêmica e, em agosto de 2011, ingressou no Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, área de concentração em Geotecnia, submetendo-se à defesa da dissertação em Julho de 2013.

ÍNDICE

LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
REVISÃO DE LITERATURA	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	xii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
1.0 INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Justificativa.....	3
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo geral.....	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.4 Organização do Trabalho.....	5
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	5
2.0 REVISÃO DE LITERATURA	6
2.1 Rejeitos de Minério de Ferro	6
2.1.1 Caracterizações física e química	8
2.1.2 Disposição	10
2.1.3 Meio Ambiente.....	11
2.1.4 Pesquisas relacionadas aos rejeitos	12
2.2 Solos na engenharia civil.....	13

2.2.1	Técnicas de estabilização de solos	14
2.2.2	Estabilização físico-química	14
2.2.2.1	Solo-cimento	15
2.2.2.2	Solo-cal.....	16
2.3	Ensaio Geotécnicos	16
2.3.1	Granulometria	16
2.3.2	Limites de consistência.....	17
2.3.3	Peso específico real dos sólidos.....	17
2.3.4	Compactação.....	18
2.3.5	Imersão de corpos de prova em água.....	18
2.3.6	Durabilidade por molhagem e secagem.....	18
2.3.7	Permeabilidade.....	19
2.3.8	Classificação MCT	19
2.3.8.1	Compactação Mini-MCV.....	20
2.3.8.2	Perda de Massa por Imersão	21
2.3.9	Determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC).....	21
2.3.10	Resistência à compressão simples	21
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22
	<i>Artigo 1</i>	26
	RESUMO	26
	ABSTRACT	27
	INTRODUÇÃO	28

Considerações gerais	28
MATERIAIS E MÉTODOS	29
Materiais	29
Rejeitos de minério de ferro.....	29
Estabilizante químico.....	30
Métodos	30
Estudos geotécnicos dos materiais.....	30
Dosagens das misturas	32
Moldagens dos corpos de prova.....	33
Sequência de trabalho.....	33
RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
CONCLUSÕES	43
AGRADECIMENTOS.....	44
<i>Artigo 02</i>	46
RESUMO	46
ABSTRACT	47
INTRODUÇÃO	48
MATERIAIS E MÉTODOS	49
Materiais	49
Rejeito de minério de ferro	49
Estabilizante químico.....	50
Métodos	51

Estudos geotécnicos dos materiais.....	51
Dosagens das Misturas.....	52
Moldagens dos corpos de prova.....	54
Sequência de trabalho	55
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
CONCLUSÕES	63
AGRADECIMENTOS.....	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65
CONCLUSÕES GERAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS....	68
CONCLUSOES GERAIS:.....	68
Para os ensaios de compactação:.....	68
Integridade de corpos de prova em imersão:	68
Durabilidade por molhagem e secagem:	69
Permeabilidade:	69
Classificação MCT:	69
Índice de Suporte Califórnia (ISC):.....	70
Resistência à compressão simples:.....	70
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS:.....	71

LISTA DE TABELAS

INTRODUÇÃO GERAL

Tabela 01 - Produção mineral do Brasil no ano-base 2011 (IBRAM, 2012)	1
--	---

REVISÃO DE LITERATURA

Tabela 01 - Resultado de análise quantitativa de metais pesados por espectrometria óptica, (CAMPANHA, 2011).	10
---	----

ARTIGO 01

Tabela 01 – Caracterização física das amostras de rejeito de minério de ferro.....	34
Tabela 02 – Caracterização física da mistura 60f-40c.....	34
Tabela 03 – Resultado dos ensaios de perda de massa por imersão segundo a Metodologia MCT.....	40
Tabela 04 – Resultados da perda de massa acumulada do ensaio de Durabilidade por molhagem e secagem, conforme o método de ensaio ME 203 (DNER, 1994b).	41
Tabela 05 - Perda de massa máxima no ensaio de durabilidade por molhagem e secagem (ABCP, 1980).	41
Tabela 06 – Perda de massa para mistura 60f-40c com 5% de cimento x Perda de massa para os rejeitos de minério de ferro individuais com 5% de cimento – Energia Intermediária.....	42
Tabela 07 - Coeficientes de permeabilidade a 20 °C (Carga Variável).	42

ARTIGO 02

Tabela 01 – Caracterização geotécnica das amostras de rejeitos de minério de ferro analisadas.	50
Tabela 02 – Teores de rejeitos de minério de ferro para diferentes misturas, em relação a porcentagem da massa seca.	53
Tabela 03 – Caracterização física da mistura de 60f-40c.....	55
Tabela 04 – Valores dos parâmetros ótimos de compactação e resistência mecânica das misturas analisadas.	56

Tabela 05 – Parâmetros dos ensaios de CBR para a mistura 60f-40c, com e sem adição de cimento.....	58
Tabela 06 – Resultados dos ensaios de resistência a compressão não confinada para misturas de rejeitos de minério de ferro, com e sem adição de cimento.	60
Tabela 07 – Parâmetros da classificação de solos segundo a metodologia MCT para amostras da mistura 60f-40c, no estado natural e com adição de cimento.....	63

LISTA DE FIGURAS

REVISÃO DE LITERATURA

- Figura 01** - Faixas granulométricas das lamas e rejeitos de flotação, típicas das usinas de processamento de minério de ferro. (CAMPANHA 2011).....9
- Figura 02** - Ábaco classificatório da Metodologia MCT, proposto por NOGAMI e VILLIBOR (1980).20

ARTIGO 01

- Figura 01** – Parâmetros ótimos e gráfico das curvas de compactação para a mistura 60f-40c.35
- Figura 02** – Imersão de corpos de prova compactados na energia Normal e Intermediária sem adição de cimento. a) Colocação dos Corpos de prova da mistura 60f-40c em imersão; b)aparência dos corps-de-prova imersos, após aproximadamente 1 min.36
- Figura 03** – Estado final dos corpos de prova após decorridos 2 minutos e retirados da bacia de imersão.37
- Figura 04** – Sequência de imagens na avaliação da imersão dos corpos de prova.38
- Figura 05** – Perda de massa em imersão para as diferentes misturas39

ARTIGO 02

- Figura 01** - Parâmetros ótimos de compactação para a mistura com teores ótimos de rejeitos de minério de ferro.58
- Figura 02** – Equação de previsão da resistência mecânica em função de diferentes teores de cimento, por meio da função quadrática de regressão.62

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

#	Peneira número
%	Porcentagem
SiO ₂	Sílica
°C	Graus Celsius
AASHTO	<i>American Association of State Highway Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Ag	Prata
Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
c	Coesão
c'	Coesão efetiva
C2S	Silicato de dicálcio
C3S	Silicato de tricálcio
Ca	Cálcio
CaO	Óxido de cálcio
CBR	Califórnia Bearing Ratio
Cd	Cádmio
Cm	Centímetro
cm ²	Centímetro quadrado
cm ³	Centímetro cúbico
cm ³ /g	Centímetro cúbico por grama
Co	Cobalto
CP-II-E-32	Cimento Portland composto com escória com resistência à compressão aos 28 dias de 32MPa
Cr	Cromo
Cu	Coeficiente de não uniformidade
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
E	Índice de vazios
φ	Ângulo de atrito
φ'	Ângulo de atrito efetivo
FAPEMIG	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais
Fe	Ferro
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro
G	Grama
g/cm ³	Grama por centímetro cúbico
Gb	Gibbsita
GC	Grau de compactação
γ _{dmáx}	Peso específico seco máximo
Go	Goethita
H	Altura do corpo de prova
Hm	Hematita
HRB	<i>Highway Research Board</i>
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
IG	Índice de grupo

IP	Índice de plasticidade
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
ISC	Índice de Suporte Califórnia
K	Coefficiente de permeabilidade
Ka	Caulinita
Kg	Quilograma
Kgf	Quilograma-força
kPa	Quilopascal
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
Mm	Milímetros
mm/min	Milímetro por minuto
Mn	Manganês
MR	Módulo de resiliência
NBR	Normas Brasileiras
Ni	Níquel
NP	Não Plástico
Pb	Chumbo
pH	Potencial hidrogeniônico
Qz	Quartzo
Si	Silício
Sr	Estrôncio
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
W	Teor de umidade
w _{ot}	Teor de umidade ótimo
Zn	Zinco
γ_s	Peso específico médio das partículas sólidas;
γ_w	Peso específico da água na temperatura do ensaio

RESUMO

OLIVEIRA, Tales Moreira de. M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2013. **Caracterização de misturas de rejeitos de minério de ferro melhoradas com adição de cimento com vistas à aplicação em estradas e aterros.** Orientador: Cláudio Henrique de Carvalho Silva. Coorientadores: Carlos Alexandre Braz de Carvalho e Dario Cardoso de Lima.

Neste trabalho, foi realizada uma campanha de ensaios de caracterização das propriedades físico-mecânicas e hidráulicas de misturas de rejeitos provenientes do beneficiamento de minério de ferro, com e sem adição de cimento Portland composto com escória, tipo CP II-E-32, visando à aplicação em camadas de pavimentos rodoviários e à construção de aterros. As amostras de rejeito foram obtidas de pontos específicos dos processos de beneficiamento do minério de ferro pelos processos de flotação e concentração magnética. Os rejeitos foram denominados de flotação e concentração e coletados na usina de beneficiamento Alegria, pertencente à Companhia Vale S.A. Para atender aos objetivos propostos, foram avaliados parâmetros geotécnicos utilizados na caracterização de camadas de pavimentos por meio de um programa experimental que abrangeu os seguintes ensaios de laboratório: (i) granulometria conjunta, (ii) limites de Atterberg (LL e LP), (iii) massa específica dos sólidos, (iv) compactação, (v) CBR, (vi) resistência à compressão simples, (vii) análise da imersão de corpos de prova em água, (viii) durabilidade por molhagem e secagem, (ix) permeabilidade e (x) aplicação da metodologia MCT (compactação Mini-MCV e perda de massa por imersão). A mistura que apresentou maior valor de CBR, com 60 % flotação + 40 % de concentração, foi identificada pelo sistema de classificação TRB, e classificada como A-4(1) e apresentou composição granulométrica compatível para utilização como material de sub-base conforme especificações do DNIT (2006). No entanto, possui um coeficiente de uniformidade entre 5 e 6, o que denota uma granulometria uniforme, refletindo negativamente no comportamento hidromecânico. Para aplicação como base de pavimentos, a mistura deverá ser estudada com um acréscimo de 8,5 % de cimento, porcentagem determinada por este trabalho, para atender à resistência mecânica média de 2,1 MPa, requerida para misturas de solo-cimento conforme ABCP (1980).

ABSTRACT

OLIVEIRA, Tales Moreira de. M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2013. **Characterization of mixtures of iron ore tailings added of cement focusing the use on roads and embankments.** Adviser: Cláudio Henrique de Carvalho Silva. Co-advisers: Carlos Alexandre Braz de Carvalho and Dario Cardoso de Lima.

This study conducted an array of tests to characterize the physic-mechanical and hydraulic properties of mixtures of iron ore tailings from the processing of iron ore, with and without addition of CP II-E-32 Portland cement with slag, aiming the application in layers of road pavements and construction of embankments. Tailing samples were obtained from specific points of iron ore processing by flotation and magnetic concentration. Tailings were termed flotation and concentration and collected from the processing plant Alegria, owned by Companhia Vale S.A. To meet the proposed goals were evaluated geotechnical parameters used in the characterization of pavement layers by means of an experimental program that included the following laboratory tests: (i) particle size tests, (ii) Atterberg limits (LL and LP), (iii) solid unit weight (iv) compaction, (v) CBR, (vi) compressive strength, (vii) analysis of immersion of specimens, (viii) durability by wetting and drying, (ix) permeability (x) application of the MCT methodology (Mini-MCV compaction and weight loss by immersion). The mixture with highest CBR value, with 60% flotation + 40% concentration, was identified by the TRB classification system and classified as A-4(1) and exhibited particle size composition compatible for use as a sub-base material according to DNIT specifications (2006). Nevertheless, it has a coefficient of uniformity between 5 and 6, which indicates a uniform grain size, reflecting negatively on the hydromechanical behavior. For application as a pavement base, the mixture should be studied with an increase of 8.5% cement, percentage determined by this work, to meet the average strength of 2.1 MPa, required for soil-cement mixtures according to ABCP (1980).

1.0 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Generalidades

Sendo um expressivo pilar da economia brasileira, o setor da mineração desempenha função central no desenvolvimento do país e, portanto, sendo de grande importância social e econômica. Em 2010, esse setor respondeu por 4,2 % do PIB e 20 % das exportações brasileira (IBRAM, 2011). Além disso, o referido setor é responsável por 2,2 milhões de empregos diretos e também está ligado à base de outras tantas cadeias produtivas (IBRAM, 2012).

O Brasil detém um dos maiores patrimônios minerais e é um dos maiores produtores e exportadores de minérios do mundo, como pode ser visto na Tabela 01 (IBRAM, 2012).

Tabela 01 - Produção mineral do Brasil no ano-base 2011 (IBRAM, 2012)

Minerais	Produção Brasileira	Posição no Ranking Mundial	Reservas Brasileiras	Posição no Ranking Mundial
Bauxita	14%	3°	6,68%	5°
Cobre	2%	5°	2%	13°
Rochas Ornamentais	7,7%	3°	5,6%	6°
Ouro	2,3%	12°	3,3%	9°
Minério de Ferro	17%	2°	11%	5°
Caulim	6,8%	5°	28%	2°
Manganês	20%	2°	1,1%	6°
Nióbio	98%	1°	98%	1°
Tantalita	28%	2°	50%	1°
Estanho	4,1%	5°	13%	3°
Zinco	2,4%	12°	0,85%	6°

Segundo a Tabela 01, o Brasil é o segundo maior produtor de minério de ferro do mundo. Sua produção em 2011 foi de 390 milhões de toneladas, o que equivale a 20 % do total mundial (1,92 bilhões de toneladas), ficando atrás apenas da Austrália. Segundo o IBRAM, em 2012, o minério de ferro ocupou o 1º lugar na lista de produtos que geraram as maiores rendas nas exportações brasileiras.

Conforme exposto, a atividade econômica da mineração configura um dos maiores setores da nossa economia. Entretanto, utiliza de recursos naturais comumente não renováveis, impactando negativamente o meio ambiente. Com um desenvolvimento acelerado dentro de um contexto bilionário, as indústrias da mineração têm enfrentado barreiras ambientais que, entre outros, dificulta a abertura de novas áreas de exploração, o que obriga a busca de soluções técnica e ambientalmente viáveis que permitam o avanço sustentável da mineração, mantendo o equilíbrio ambiental.

Assim, dentro do contexto até então abordado, surge a ideia do "Desenvolvimento Sustentável" aplicado à mineração, que busca conciliar o desenvolvimento econômico com a minimização dos impactos ambientais e preservando ambientalmente áreas estratégicas.

Conforme Chammas (1989), os processos de lavra e de beneficiamento do minério geram consideráveis modificações no meio ambiente. Na lavra, são produzidos os estéréis pelo processo de decapeamento da mina. Estes rejeitos são constituídos pelo material que recobre a rocha ou que ocorre dentro do corpo do minério de ferro, sem valor econômico, que é lavrado e disposto em pilhas, (ARAÚJO, 2006). No beneficiamento do minério, geram-se outros subprodutos denominados rejeitos, também de baixo valor econômico, e que de modo geral são gerados sob a forma de polpa, podendo ser inertes (não reagem quimicamente e não são contaminantes) e ativos (reagem quimicamente e são contaminantes). Tais rejeitos são geralmente armazenados em diques e barragens.

Com o crescimento das preocupações ambientais em consequência de inúmeros casos concretos de desastres ambientais ocorridos em decorrência de inobservância de cuidados básicos no projeto, armazenamento e operação de tais barragens de rejeito, torna-se necessário a busca de soluções alternativas e mitigadoras em função da crescente demanda por recursos minerais.

Do lado das empresas mineradoras, existe uma grande preocupação relacionada às áreas necessárias para a retenção da enorme quantidade de resíduos gerados em seu processo operacional, sendo já uma realidade a limitação de áreas para estocagem desses resíduos, passíveis de grande impacto ambiental.

Neste trabalho de pesquisa busca-se analisar a viabilidade técnica de aplicação de rejeitos arenosos de minério de ferro como material geotécnico na pavimentação rodoviária e construção de aterros.

1.2 Justificativa

A realização desta pesquisa foi motivada por razões de ordem teórica e prática.

As razões teóricas são relativas à carência de literaturas técnicas que abordem a complexidade envolvida no tratamento (ou estabilização) das propriedades geotécnicas de rejeitos de minério de ferro pela adição de cimento Portland.

As razões práticas principais estão associadas à carência de áreas para retenção das grandes quantidades de rejeitos de minério de ferro. Neste contexto, busca-se apresentar uma análise da viabilidade técnica do aproveitamento de rejeitos de minério de ferro como um material geotécnico em obras de pavimentação e em aterros.

Busca-se ainda a criação de materiais alternativos com propriedades geotécnicas que atendam às especificações e normas vigentes no Brasil na área de pavimentação.

Portanto, dentro deste contexto em que a disposição atual dos rejeitos cria grandes impactos ambientais e em que já se tornou realidade a falta de espaço para a sua disposição, a possibilidade de utilizar o rejeito de minério como material alternativo na Engenharia Civil deve ser estudada e a Engenharia Geotécnica possui um grande potencial para esse fim, uma vez que podem ser dados destinos nobres a este tipo de resíduo, como na execução de camadas de pavimento rodoviário (reforço de subleito, sub-base e base) e como material de enchimento na construção de muros de solo reforçado, na construção de aterros rodoviários, entre outras aplicações geotécnicas de interesse.

Além disto, outro ponto motivador refere-se ao fato de que os rejeitos tornam-se uma opção em função da sua grande disponibilidade, em face do aumento significativo da produção mineral nos últimos anos. Também devido à existência, de muitas áreas urbanas e rurais, carentes de material granular apropriado para execução de camadas do pavimento.

Ressalta-se que este trabalho de pesquisa dará continuidade a estudos que vêm sendo desenvolvidos no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da

Universidade Federal de Viçosa, relativos à aplicação geotécnica de rejeitos de minério de ferro em pavimentação.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral estudar a viabilidade técnica de emprego de misturas de rejeitos arenosos oriundos do beneficiamento de minério de ferro melhoradas com adição de cimento Portland, visando ao seu emprego em obras geotécnicas, principalmente em obras rodoviárias.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Proceder a uma caracterização física de misturas de rejeitos de minério de ferro, através dos seguintes ensaios de laboratório:
 - ✓ Granulometria conjunta;
 - ✓ Limites de consistência (Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade) e
 - ✓ Massa específica dos sólidos.

- b) Analisar os comportamentos mecânico e hidráulico de misturas dos rejeitos de minério de ferro supracitados, melhoramentos (ou estabilizados) com cimento Portland CP II–E-32, através dos seguintes ensaios geotécnicos de laboratório:
 - ✓ Compactação;
 - ✓ Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou *Califórnia Bearing Ratio* (CBR);
 - ✓ Resistência à compressão simples;
 - ✓ Durabilidade por molhagem e secagem;
 - ✓ Compactação Mini-MCV e Perda de massa por imersão (Metodologia MCT);
 - ✓ Permeabilidade e

- ✓ Integridade de corpos de prova em imersão.

1.4 Organização do Trabalho

Apresenta-se, neste item, a estrutura geral desse trabalho, com uma síntese do que trata o corpo desta dissertação. O trabalho está dividido em introdução geral, já apresentado, revisão de literatura, artigos e conclusões gerais.

A revisão de literatura aborda sobre os rejeitos de minério de ferro oriundos do processo de beneficiamento por flotação e concentração magnética, o uso do solo na Engenharia Geotécnica de forma sucinta, relatando algumas técnicas de estabilização de solos, e os ensaios geotécnicos para caracterização física e determinação das resistências mecânica e hidráulica desses rejeitos, que são fundamentais para auxiliar na execução desta pesquisa e na análise e discussão dos resultados.

O artigo 1 é intitulado “Propriedades hidromecânicas de misturas de rejeitos de minério de ferro melhoradas com cimento Portland.”

O artigo 2 aborda um estudo sobre as propriedades geomecânicas de misturas de rejeitos de minério de ferro melhoradas com cimento.

Nas conclusões gerais discorre-se sobre as principais conclusões obtidas neste trabalho e apresentam-se sugestões para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, C. B. **Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro**. 2006. 136 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em engenharia civil) - COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CHAMMAS, R. **Barragens de Contenção de Rejeitos**. 1989. 29 f. Notas de Aula (Curso de Especialização em Engenharia de Barragens - CEEB), Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, 1989.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Sistemas de Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira**. Brasília/DF: IBRAM, 2011. 6ª edição. 28p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Sistemas de Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira**. Brasília/DF: IBRAM, 2012. 7ª edição. 68p.

2.0 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Rejeitos de Minério de Ferro

A exploração mineral gera uma quantidade enorme de resíduos cuja disposição adequada torna-se um condicionante relacionado à viabilidade da atividade mineral, bem como impasse ambiental. Dentre os materiais gerados pela extração do minério de ferro, incluem-se os chamados minérios pobres, cujo teor de minério é baixo considerando os custos momentâneos de exploração e beneficiamento, ou ainda considerando-se a inexistência de processos tecnológicos que permitam a sua exploração, sendo estes chamados de estéreis e rejeitos (CAMPANHA, 2011).

Neste trabalho, utilizaram-se rejeitos de minério de ferro amostrados nos processos de beneficiamento e que foram identificados conforme o ponto de origem. Assim, têm-se o rejeito de flotação, gerado pelos hidrociclones no processo de separação dos minerais por flotação e o rejeito de concentração magnética, obtido no cone desaguador dos rejeitos de concentração magnética.

No processo de beneficiamento para obtenção de minério de ferro, a rocha é submetida a etapas sucessivas de peneiramento, britagem, moagem, deslamagem e flotação em colunas, obtendo-se o ferro concentrado e eliminando-se as impurezas, principalmente a sílica, onde o subproduto oriundo desse beneficiamento é nomeado de rejeito (ARAÚJO, 2006).

Atualmente, o processo de beneficiamento por flotação é o mais eficiente e versátil para se obter a concentração de minérios. O uso da flotação permite a concentração de minérios de baixo teor de ferro, o que antes tornava o beneficiamento desse material economicamente inviável (WILLS e NAPIERMUNN, 2006).

No processo de beneficiamento por flotação, as partículas de mineral, minério e ganga, uma vez liberadas e em suspensão na polpa processada, têm sua hidrofobicidade alterada pela adição de reagentes químicos, criando diferenciabilidade entre as espécies envolvidas. A separabilidade dinâmica na flotação ocorre com a adição de bolhas de ar na polpa, causando o arraste de partículas de ganga hidrofobizadas para cima e

afundamento de partículas de mineral hidrofilizadas. Em um reator do processo de beneficiamento por flotação, a polpa alimentada é previamente tratada com os reagentes que induzem a diferenciabilidade entre as espécies envolvidas. O material alimentado segue um fluxo descendente por gravidade e entra em contato com as bolhas de ar em contracorrente. A ganga hidrofobizada é flotada com as bolhas de ar e direcionada ao rejeito por transbordo, enquanto o concentrado decanta e é recolhido pelo fundo do reator (BASTOS JÚNIOR, 2010).

A flotação de minério de ferro pode ser realizada basicamente de quatro formas distintas (OLIVEIRA, 2006):

- ✓ flotação de minerais oxidados de ferro, utilizando coletores aniônicos (ácidos carboxílicos e sulfatos), em pH na faixa neutra a ácida;
- ✓ flotação de sílica, utilizando coletores aniônicos (ácidos carboxílicos) em pH alcalino, ativado por cálcio;
- ✓ flotação catiônica de minerais oxidados de ferro, utilizando aminas como coletores e ativação por flúor, em pH ácido;
- ✓ flotação catiônica de quartzo, utilizando aminas, em pH na faixa neutra alcalina.

Já o processo de beneficiamento por separação magnética utiliza como propriedade diferenciadora o comportamento das partículas sob a ação de um campo magnético. Os separadores magnéticos têm sido muito utilizados para a separação de magnetita e hematita de quartzo (OLIVEIRA, 2010). A separação magnética de minério de ferro pode se dar por processamento seco ou úmido. O rejeito de minério de ferro oriundo do processo de beneficiamento por concentração magnética, utilizado no presente trabalho, foi obtido pelo processamento úmido.

As forças que atuam em uma determinada partícula, colocada em um campo magnético, numa separação magnética por processamento úmido são: força magnética, força de gravidade, força de arraste hidrodinâmico e força interpartículas, (OLIVEIRA, 2006).

Com base na susceptibilidade magnética podem-se classificar os materiais ou minerais em duas categorias: (i) os atraídos pelo campo magnético, e (ii) os repelidos

pelo campo magnético. No primeiro, caso têm-se os minerais ferromagnéticos, os quais são atraídos fortemente, e os paramagnéticos, que são atraídos fracamente pelo campo magnético. Aqueles que são repelidos pelo campo magnético denominam-se diamagnéticos.

Cabe ainda relatar que recentemente tem-se verificado grandes avanços no referido método magnético, podendo citar a utilização da tecnologia dos supercondutores, que abriu um novo horizonte na área de processamento de minérios (LAGE, 2010).

O fluxo, ou o caminho, que relaciona os processos de separação magnética e flotação pode ser assim resumido: o material que chega para o processo de separação magnética é oriundo de um classificador espiral, tratando-se do *underflow* que é a parcela mais grosseira da polpa, já o *overflow* do referido classificador é encaminhado para o sistema de hidrociclones e o *underflow* dos hidrociclones é encaminhado para o sistema de flotação.

As separações, seja pelo processo de flotação ou pela concentração magnética, processam-se pela utilização de propriedades mecânicas, físicas e químicas, tendo em cada estágio materiais de diferentes granulometrias e de diferentes concentrações minerais.

2.1.1 Caracterizações física e química

Através de avaliação genérica dos rejeitos, normalmente oriundos de processos de beneficiamento de extração de minério de ferro na região do Quadrilátero Ferrífero do estado de Minas Gerais revelou-se que cerca de 60 % a 70 % destes apresentam uma granulometria tendendo às areias fina e média siltosas, conforme pode ser observado na Figura 01.

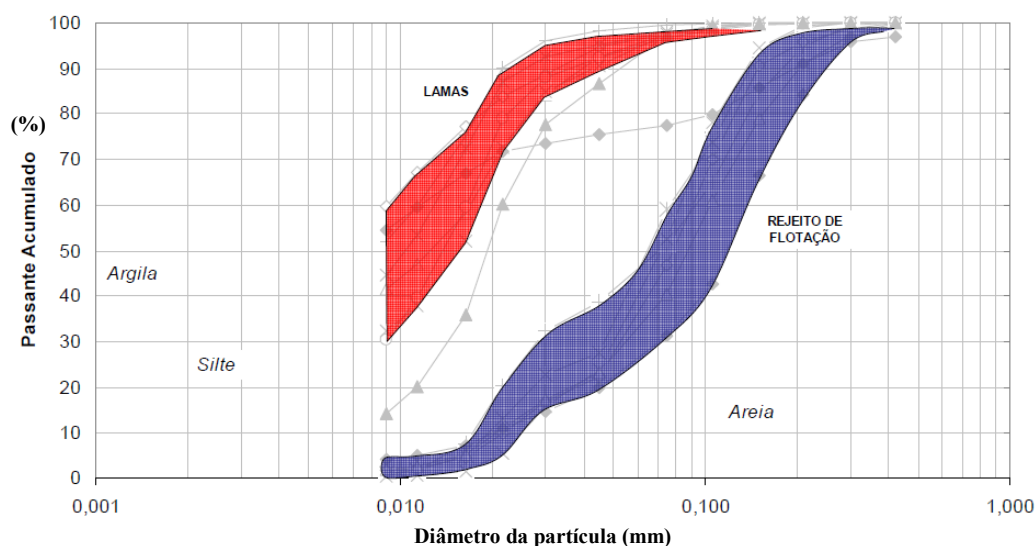


Figura 01 - Faixas granulométricas das lamas e rejeitos de flotação, típicas das usinas de processamento de minério de ferro. (CAMPANHA 2011).

Resultados alcançados por Campanha (2011) e Pinto (2013) confirmam a tendência já relatada sobre as faixas granulométricas dos rejeitos de minério de ferro oriundos do processo de beneficiamento por flotação e concentração magnética. Esses autores utilizaram rejeitos de minério de ferro obtidos dos processos de flotação e concentração magnética com característica textural areno-silto-argilosa. Estes rejeitos foram considerados materiais não plásticos ou com plasticidade muito baixa e apresentaram valores de pesos específicos dos sólidos elevados e superiores a 50 kN/m³, possivelmente em função dos altos teores de ferro ainda presentes nos mesmos.

Campanha (2011), em seus estudos, encontrou para estes rejeitos os seguintes valores de pH: (i) rejeito do processo de flotação - 8,11 (fortemente alcalino), e (ii) rejeito do processo de concentração magnética - 6,13 (levemente ácido). Os principais argilominerais presentes nos materiais supracitados foram: Ka: Caulinita, Go: Goethita, Gb: Gibbsita, Qz: Quartzo, e Hm: Hematita. A Figura 02 apresenta os resultados quantitativos da análise de metais por espectrometria óptica dos rejeitos oriundos dos processos de flotação e concentração magnética.

Tabela 01 - Resultado de análise quantitativa de metais pesados por espectrometria óptica, (CAMPANHA, 2011).

	Rejeito de Concentração				Rejeito de Flotação			
	a	b	C	Média	a	b	c	Média
Al	5,20	5,11	5,14	5,15	6,75	6,58	6,37	6,567
Cd	0,032	0,032	0,034	0,033	0,019	0,021	0,020	0,020
Co	0,004	0,004	0,004	0,004	0,000	0,002	0,001	0,001
Cr	0,253	0,251	0,262	0,255	0,135	0,143	0,142	0,140
Fe	296,0	311,5	328,1	311,9	211,9	204,5	203,4	206,6
Mn	0,474	0,514	0,532	0,507	0,231	0,222	0,222	0,224
Ni	0,021	0,020	0,021	0,021	0,008	0,009	0,009	0,009
PB	0,002	0,002	0,002	0,002	0,037	0,035	0,036	0,036
Sr	0,004	0,004	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003
V	0,016	0,015	0,016	0,015	0,010	0,011	0,011	0,010
Zn	0,046	0,044	0,046	0,045	0,042	0,044	0,046	0,044
Si	116,290	-	119,57	117,93	200,37	186,480	-	193,425

2.1.2 Disposição

Os rejeitos de minério de ferro oriundos dos processos de beneficiamento por flotação e concentração magnética são dispostos em barragens ou diques, sendo transportados na forma de polpa (uma mistura de sólidos mais água). Esta polpa apresenta um teor de sólidos da ordem de 25 % a 30 %, sendo, portanto, bastante fluida para permitir o seu bombeamento por longas distâncias até a disposição final nas barragens ou diques de rejeito.

A barragem de rejeito é uma estrutura geotécnica de barramento que possui estabilidade para suportar as tensões geradas pela praia de rejeito que é resultante da mistura de rejeitos e água, e devem permanecer estáveis por longos períodos de tempo.

A disposição de rejeitos é foco de diferentes estudos, visto que os investimentos de uma empresa mineradora são relativamente altos na construção e manutenção desta estrutura. Ainda cabe relatar que o perfeito funcionamento destes sistemas é fundamental para a contínua realização das atividades minerais (ESPÓSITO, 2005).

Conforme Espósito (2005), as barragens de rejeito podem ser construídas com material compactado proveniente de áreas de empréstimo, ou com material do próprio rejeito (partículas de granulometria mais grossa) que pode ser separado pelo processo de ciclonagem.

Quando construídas de rejeito, as barragens sofrem um processo de crescimento chamado de alteamento, podendo ser construídas pelos métodos de montante, linha de

centro e jusante, de tal forma que o método de montante tende a ser o mais atrativo para as mineradoras visto que constitui-se no método mais econômico (ESPÓSITO, 2005).

O grande problema da disposição em barragens refere-se a dois itens, sendo um o agressivo impacto ambiental gerado em grandes áreas e o outro o custo de implantação e manutenção (ESPÓSITO, 2005).

2.1.3 Meio Ambiente

O principal e mais característico impacto causado pela atividade mineradora é o que se refere à degradação visual da paisagem. Não se pode, porém, aceitar que tais mudanças e prejuízos sejam impostos à sociedade, da mesma forma que não se pode impedir a atuação da mineração, uma vez que ela é exigida por essa mesma sociedade (SILVA, 2007).

Segundo Bacci (2006), os efeitos ambientais estão associados, de modo geral, às diversas fases de exploração dos bens minerais, como à abertura da cava (retirada da vegetação, escavações, movimentação de terra e modificação da paisagem local), ao uso de explosivos no desmonte de rocha (sobrepessão atmosférica, vibração do terreno, ultralancamento de fragmentos, fumos, gases, poeira, ruído), ao transporte e beneficiamento do minério (geração de poeira e ruído), afetando os meios como água, solo e ar, além da população local.

No que se refere às mineradoras de ferro, uma grande preocupação está relacionada aos espaços necessários no ambiente para reter a enorme quantidade de resíduos gerados em seu processo operacional, sendo já uma realidade a falta de áreas para estocagem deste amontoado de resíduos, passíveis de grande impacto ambiental negativo.

Ainda que se considere o fato destes rejeitos apresentarem elevados teores de minério de ferro que poderão no futuro ser reprocessados, tanto em função da escassez natural das atuais reservas minerais, como em função de novas técnicas de processamento, durante a existência do projeto, estas áreas ocupadas serão altamente impactantes ao ambiente.

Neste contexto e visando outra possibilidade de disposição, Campanha (2011) estudou separadamente cada um dos rejeitos dos processos de beneficiamento por

flotação e concentração magnética, visando sua aplicação em pavimentos rodoviários, concluindo que estes materiais podem ser utilizados em camadas de sub-base de pavimento flexíveis.

2.1.4 Pesquisas relacionadas aos rejeitos

Segundo Campanha (2011), a investigação, em laboratório, dos rejeitos de minério de ferro objetivou o estudo da viabilidade técnica do uso desses materiais na construção de pavimentos rodoviários. Os resultados alcançados permitiram concluir que, pelo sistema de classificação TRB, o rejeito do processo de beneficiamento por flotação foi classificado como pertencente ao grupo A4 e o pertencente ao processo de beneficiamento por concentração magnética ao grupo A3, e que suas composições granulométricas são compatíveis para utilização em camadas de sub-base ou base em solo-cimento. Os resultados dos ensaios de CBR dos dois rejeitos de minério de ferro utilizados por essa autora, traduzidos pelo índice de suporte Califórnia e pela expansão CBR, foram compatíveis com as especificações e normas técnicas vigentes no Brasil para utilização na construção de camada de sub-base de pavimentos flexíveis. Ainda segundo essa autora, em seu estudo, as análises por difratometria apresentaram presença de argilominerais não-expansivos.

O comportamento apresentado em ensaios de módulo de resiliência foi satisfatório. O modelo de melhor ajuste do módulo de resiliência foi o "modelo composto", em que o comportamento resiliente do material é explicado em função da tensão desviadora e da tensão confinante.

Ainda segundo Campanha (2011), estes rejeitos arenosos de mineração de ferro apresentam potencial para uso em pavimentação rodoviária, especialmente, quando estabilizados com adição de cimento.

Pinto (2013) estudou misturas dos rejeitos com solo e/ou com escória de aciaria e conclui que para todas as amostras ensaiadas o percentual de areia foi superior a 60 %, compostas majoritariamente por areia fina e média. De fato, a pequena quantidade de argila presente nas misturas estudadas pelo citado autor, foi constatada pelo comportamento não plástico (NP) obtido nos ensaios de Limites de Liquidez e de Plasticidade. A mistura de melhor capacidade de suporte apresentou o seguinte traço: 24 % de rejeito de flotação, 16 % de rejeito de concentração, 30 % de escória de aciaria

e 30 % de cascalho. Através da análise de resistência determinou-se que o ângulo de atrito dos materiais estudados foi típico de material arenoso compacto, com ϕ' variando de $33,1^\circ$ a $40,6^\circ$. Os valores de coesão variaram de $16,7 \text{ kN/m}^2$ a $47,4 \text{ kN/m}^3$, indicando que a pequena porcentagem de materiais finos presentes nas misturas ainda forneceu características coesivas a estes materiais. Os resultados para análise de resiliência apontaram que os valores do módulo de resiliência de todas as misturas analisadas foram típicos de materiais utilizados para camadas estruturais de sub-bases de pavimentos rodoviários.

Segundo relata Pinto (2013), as amostras estudadas apresentaram resultados superiores a 30 % no ensaio de equivalente de areia. Conclui, este autor, que todos materiais e misturas estudados podem ser aplicados em camadas de sub-base, segundo o Método de Projetos de Pavimentos Flexíveis presente no manual de pavimentação do DNIT (2006).

2.2 Solos na engenharia civil

Desde a formação da terra, a crosta, sobretudo na sua superfície externa exposta à atmosfera, apresenta-se sobre a influência de diversos fatores destrutivos internos e externos, chamados de intemperismo, devidos as grandes variações de temperatura, ventos, água e outros fatores, podendo ser do tipo físico, químico e biológico, tal que os dois primeiros tipos de intemperismo tendem a ser os mais marcantes, visto que o intemperismo biológico geralmente ocorre de forma localizada. Estes fenômenos naturais produzem ao longo do tempo a decomposição das rochas, diminuindo-as de tamanho e resistência, levando-as a se transformarem nos solos.

Quando o solo, produto do processo de decomposição, permanece no próprio local onde se deu o fenômeno, ele é chamado solo residual. Quando, depois de decomposto, é carregado pela água das enxurradas ou rios, pelo vento, pela gravidade ou por vários destes fatores simultaneamente, ele é dito solo transportado. Pode-se ainda encontrar, no ambiente, outros tipos de solos, entre os quais aqueles que contêm elementos de decomposição orgânica que se misturam ao solo transportado, chamados de solos orgânicos.

Segundo Salomão e Antunes (1998), na Engenharia Civil, o solo é definido como material escavável por equipamentos manuais e que perde sua resistência quando

em contato com a água. É visual e evidente que a maioria das obras civis se apoia sobre a superfície terrestre, sendo executados nestes locais sobre solos e rochas. Por tanto, pode-se dizer que os solos são materiais naturais de construção por excelência, podendo ainda ser utilizados nas próprias obras como materiais de empréstimo.

Conforme Medina (1987), nem sempre é possível obter na natureza, de forma técnica e economicamente viável, solos naturais que preenchem todas as exigências de um projeto geotécnico. Assim, torna-se necessário escolher entre aceitar o material tal como ele é e desenvolver o projeto de forma a contemplar as limitações que o solo impõe, remover o material e substituí-lo por outro de melhor qualidade ou alterar as propriedades do solo existente de modo a criar um novo material capaz de adequar-se de melhor forma às exigências do projeto. Neste contexto, a estabilização de solos consagra-se na maioria das vezes como sendo a técnica mais viável economicamente.

2.2.1 Técnicas de estabilização de solos

Segundo Pinto (2008), a estabilização de solos consiste na aplicação de procedimentos que visam à melhoria da estabilidade de parâmetros geotécnicos do solo, como resistência mecânica, deformabilidade, permeabilidade, durabilidade e outros, bem como garantir a manutenção destas melhorias no tempo de vida útil das obras de engenharia.

A melhoria dos parâmetros geotécnicos de interesse no solo pode ser realizada por meio de interações físico-químicas e por meio mecânico. As interações físico-químicas consistem da adição de aditivos que interagem com as partículas do solo visando, em geral, à melhoria nas propriedades mecânicas e hidráulicas, enquanto a estabilização mecânica resume-se nas técnicas de compactação dos solos e estabilização granulométrica.

2.2.2 Estabilização físico-química

Antes de relatar sobre a interação físico-química dos solos, cabe diferenciar os termos solo melhorado com cimento e solo-cimento. O primeiro termo é utilizado para descrever a interação com propósito de melhorar propriedades do solo sem o objetivo de ganho significativo de resistência mecânica, com aplicações de teores de cimento na ordem de 2% a 4%, enquanto o termo solo-cimento refere-se ao solo estabilizado que

designa a adição físico-química com propósito de aumento substancial da resistência mecânica, com teores de cimento usualmente na ordem de 6% a 10% (DNIT, 2006).

Outro termo empregado, na área de pavimentação referente a adição de cimento, é designado por solo tratado com cimento. Segundo DER/PR (2005), este termo define mistura de solo com cimento na qual obtém-se aos 7 dias de cura, resistência à compressão simples com valores entre 1,2 MPa a 2,1 MPa.

De modo geral, os aditivos que interagem com as partículas do solo visando à melhoria e estabilidade nas propriedades mecânicas e hidráulicas são os que seguem: cimento, cal, asfaltos e betumes, produtos químicos industrializados (cloretos, ácidos fosfóricos e outros.) e produtos comerciais (Pavifort, Ecolopavi, Dynabaseetc, dentre outros).

Os principais aditivos em uso no campo da estabilização de solos no Brasil ainda são o cimento e a cal, que possuem uma interação química diferenciada a depender da pedologia do solo.

2.2.2.1 Solo-cimento

Solo-cimento é o produto endurecido resultante da mistura íntima compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através de dosagem racional, executada de acordo com as normas aplicáveis ao solo em estudo, conforme a NBR 7207 (ABNT, 1982).

O cimento apresenta em sua composição altos percentuais de óxidos de cálcio (CaO) e de sílica (SiO₂). Trata-se de um material heterogêneo, apresentando fases silicatadas (C3S, C2S) e fases aluminosas (C3A, C4AF), em que C = CaO; S = SiO₂; A = Al₂O₃; F = Fe₂O₃ e H = H₂O (FONTES, 2008).

A mistura solo-cimento é mais eficiente se utilizada em solos granulares, uma vez que a ação cimentante desenvolvida se dá através de produtos da hidratação pelo mecanismo de cimentação dos grãos entre si em pontos de contato. Em outras palavras, os solos granulares, por apresentarem menor área de superfície específica, reagem melhor com o cimento, o que não ocorre com os solos finos que, por apresentarem área de superfície específica maior, necessitam de grandes quantidades de cimento para que se realize a cimentação dos pontos de contato. O que acaba ocorrendo nos solos

predominantemente finos (argilosos) é a ação cimentante principal se dando por reações secundárias, (KNOP, 2003).

2.2.2.2 Solo-cal

As reações provenientes da interação entre o solo e a cal podem ser resumidas em trocas catiônicas, flocculação-aglomeração, compressão da dupla camada difusa, adsorção de cal, reações pozolânicas e carbonatação. De modo geral, as principais propriedades e características dos solos que influenciam estas reações solo-cal são as que se seguem: pH do solo, teor de matéria orgânica, drenagem natural, presença de carbonatos e/ou sulfatos, ferro extraível, relação sílica/alumina e relação sílica/sesquióxidos. Assim posto, relata-se que, de um modo geral, as propriedades que beneficiam a reação são encontradas de forma mais expressiva nos solos finos, e geralmente a reação com a cal ocorre melhor nos solos argilosos, (NEVES, 2013).

2.3 Ensaios Geotécnicos

Apresenta-se, a seguir, uma descrição sucinta dos ensaios de caracterização geotécnica realizados neste trabalho.

2.3.1 Granulometria

Com base na norma técnica NBR 7181 (ABNT, 1984d) e com o objetivo de se obter a distribuição granulométrica do solo, ou seja, a percentagem em peso que cada fração de grãos representa na massa seca total da amostra de solo, realiza-se o ensaio de granulometria que divide-se em duas fases distintas e utilizadas de acordo com o tipo de solo e as finalidades do ensaio. Assim, a análise granulométrica é realizada por peneiramento para a fração grossa do solo, ou seja, para os materiais granulares, e o ensaio de sedimentação executado para as frações finas. Os solos grossos (pedregulhos e areias), possuindo pouca ou nenhuma quantidade de finos, podem ter a sua curva granulométrica inteiramente determinada utilizando-se somente o peneiramento. Entretanto, para os solos possuindo quantidades de finos significativas, deve-se proceder ao ensaio de granulometria conjunta, que engloba as fases de peneiramento e sedimentação dos materiais finos, uma vez são materiais impossíveis de serem caracterizados granulometricamente com o uso de peneiras. Através dos resultados

obtidos desse ensaio, é possível a construção da curva de distribuição granulométrica, que possui fundamental importância na caracterização geotécnica do solo.

2.3.2 Limites de consistência

Os limites de consistência dos solos dependem das suas peculiaridades de fábrica e estrutura. Os valores desses limites são utilizados pela grande maioria dos sistemas de classificação de solos existentes na geotecnia. Além disto, existe uma grande variedade de correlações empíricas que utilizam destes limites para previsão de características como resistência mecânica, permeabilidade e deformabilidade dos solos.

Os procedimentos adotados em laboratório para a determinação dos limites de liquidez e plasticidade estão descritos nas seguintes normas, respectivamente: NBR 6459 (ABNT, 1984a) e NBR 7180 (ABNT, 1984c).

O Limite de Liquidez (LL) é definido como o teor de umidade abaixo da qual o solo se comporta como material plástico. É a umidade de transição entre os estados líquido e plástico do solo. Experimentalmente, segundo as normas brasileiras o limite de liquidez de um solo corresponde ao teor de umidade com que uma pasta de solo, colocada no aparelho de Casagrande, fecha uma ranhura previamente aberta, utilizando-se equipamento padrão chamado cinzel, com largura de aproximadamente 1,2 cm, sob o impacto de 25 golpes, fornecidos pelo aparelho de Casagrande, aplicados a velocidade e altura de queda padrões.

Define-se como Limite de Plasticidade (LP) teor de umidade em que o solo deixa de ser plástico, tornando-se “quebradiço”. É a umidade de transição entre os estados plástico e semi-sólido do solo. Experimentalmente, em laboratório, o limite de plasticidade de um solo é obtido determinando-se o teor de umidade no qual um cilindro de solo com 3 mm de diâmetro e 10 cm de comprimento começa a apresentar fissuras, ou parte-se abruptamente quando moldado.

2.3.3 Peso específico real dos sólidos

O peso específico real dos sólidos de um solo é o valor médio do peso específico dos grãos dos minerais que o compõe, ou seja, os vazios não são computados ou considerados. A sua obtenção é necessária para o cálculo do ensaio de sedimentação e

para determinação de diversos índices físicos do solo como, por exemplo, o índice de vazios. Para esta finalidade este ensaio tem como fundamentação teórica o princípio de Arquimedes, segundo o qual um corpo submerso num líquido sofre um empuxo vertical cujo valor é igual ao peso do volume de líquido deslocado pelo corpo, conforme a norma técnica NBR 6508 (ABNT, 1984b).

2.3.4 Compactação

Para a construção de obras de infraestrutura, em geral, é sempre necessário realizar o ensaio de compactação de solos, conforme a norma técnica NBR 7182 (ABNT, 1986), de onde é possível se obter uma correlação entre o teor de umidade e o peso específico seco aparente de um solo para uma determinada energia de compactação. A compactação dos solos leva a um aumento da sua resistência ao cisalhamento, diminuindo o seu índice de vazios, sua permeabilidade e sua compressibilidade. O ensaio de compactação pode ser realizado utilizando-se diferentes valores de energia (Proctor Normal, Intermediário e Modificado), conservando-se, contudo, os procedimentos básicos do ensaio. A compactação é um método de estabilização dos solos que se dá por transferência de energia mecânica (impacto, vibração, compressão estática ou dinâmica).

2.3.5 Imersão de corpos de prova em água

Conforme Matos (2011), como critério de avaliação qualitativa do comportamento frente à estabilidade por meio da desagregação das amostras de solos ou materiais alternativos compactados frente à ação da água, pode-se realizar a imersão de corpos de prova compactados, nas condições de umidade ótima e peso específico seco máximo aparente, com a finalidade de analisar a sua integridade.

2.3.6 Durabilidade por molhagem e secagem

O ensaio de durabilidade por molhagem e secagem pode ser executado em conformidade com o método de ensaio ME 203 (DNER, 1994), que é específica para trabalho técnico com mistura de solo-cimento. Empregam-se para esta finalidade corpos de prova compactados nas energias Proctor Normal, Intermediária ou modificada. Esse ensaio consiste na determinação da perda de massa dos corpos de prova quando submetidos a ciclos de molhagem e secagem.

2.3.7 Permeabilidade

O coeficiente de permeabilidade é a grandeza que mede a facilidade com que um fluido escoar através de um meio poroso. No caso do solo, o seu valor depende fundamentalmente da viscosidade do fluido, do índice de vazios do solo, do seu grau de saturação, do tamanho e forma das partículas que o compõem, da sua estrutura e da composição mineralógica dos grãos. O coeficiente de permeabilidade tem dimensão de velocidade e nenhum outro parâmetro de interesse na engenharia possui uma amplitude de variação de valores tão grande como a permeabilidade. A determinação desse coeficiente baseia-se na lei de Darcy para escoamento laminar, segundo a qual a velocidade de percolação é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico, e pode ser feita em laboratório utilizando-se de permeâmetros de carga constante ou de carga variável. O conhecimento da permeabilidade, no caso específico das obras de terra, é requerido em todos os problemas que envolvem fluxo d'água, como por exemplo, percolação de água através do maciço e da fundação de barragens de terra, drenagem, rebaixamento de nível d'água, recalques, etc. Podendo ser executado conforme NBR 14545 (NBR 2000).

2.3.8 Classificação MCT

Visando a obtenção de uma classificação de solos com base em propriedades mecânicas e hidráulicas e verificando se o seu comportamento enquadra-se aos parâmetros classificatórios dos solos lateríticos, utiliza-se da caracterização do solo segundo a metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) em que é necessária a realização de ensaios de laboratório para moldagem de corpos de prova de pequeno porte, com volume de, aproximadamente, 98 cm³, 50 mm de diâmetro e 50 mm de altura. Estes corpos de prova são obtidos na execução do ensaio de compactação Mini-MCV que permite a obtenção dos coeficientes classificatórios c' e d' . Ainda faz-se necessário também realizar outro ensaio no corpo de prova obtido pela compactação Mini-MCV, denominado de perda de massa por imersão. A execução deste ensaio permite a obtenção do coeficiente classificatório e' , calculado em função da perda de massa por imersão assim obtida. Dispondo-se dos coeficientes classificatórios obtidos nos ensaios supracitados, é possível classificar os solos segundo a Metodologia MCT,

bastando para tanto a localização do ponto de coordenadas dos coeficientes c' e e' no Ábaco classificatório (Figura 02) proposto por NOGAMI e VILLIBOR (1980).

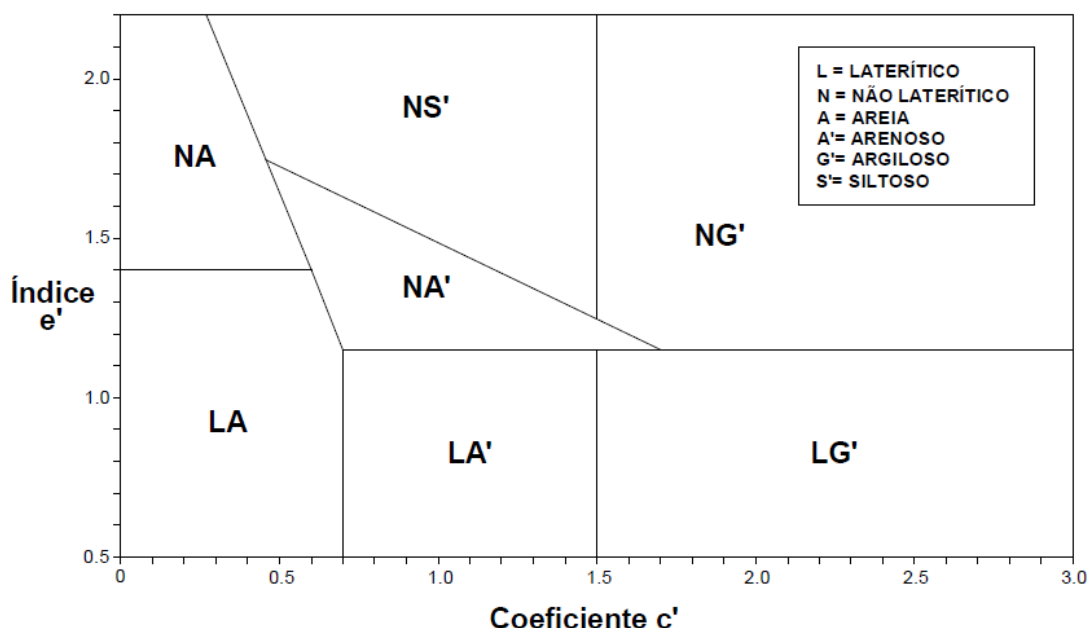


Figura 02 - Ábaco classificatório da Metodologia MCT, proposto por NOGAMI e VILLIBOR (1980).

Todo procedimento deve atender também o que propõe a norma classificatória DNER-CLA 259/1996 – Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura.

2.3.8.1 Compactação Mini-MCV

A compactação Mini-MCV foi adaptada do original inglês MCV (Moisture Condition Value) que foi concebido por Parsons (1976). Sob a orientação de Nogami, SÓRIA e FABBRI (1980), desenvolveram uma adaptação do equipamento de compactação de corpos de prova de dimensões reduzidas (diâmetro = 50 mm) para execução de um ensaio que utiliza o mesmo princípio do MCV. Este novo ensaio foi chamado de Mini-MCV. No ensaio Mini-MCV, utiliza-se um processo de compactação que permite que, durante a aplicação dos golpes, seja medida a altura do corpo de prova resultante de um conjunto de golpes aplicados. A densidade do corpo de prova tende a um valor próximo da condição de saturação. Para cada teor de umidade há uma energia (números de golpes) que leva a amostra a este estado de compactação SÓRIA e FABBRI (1980).

2.3.8.2 Perda de Massa por Imersão

Para a obtenção do coeficiente e' , além do coeficiente d' , é necessária a determinação da porcentagem de perda por imersão (P_i), que é realizada com o corpo de prova resultante da compactação Mini-MCV, quando o mesmo é extrudado, aproximadamente, 1 cm do cilindro e é submerso horizontalmente em água, para a determinação do seu percentual de perda de massa por imersão. NOGAMI e VILLIBOR (1980)

2.3.9 Determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC).

O ISC é um índice amplamente utilizado no dimensionamento de pavimentos flexíveis. O ensaio de índice de suporte Califórnia (ou CBR – Califórnia Bearing Ratio) fornece informações acerca das propriedades de resistência mecânica, deformabilidade e expansividade dos solos, permitindo assim um julgamento de suas potencialidades para o uso em camadas de pavimentos rodoviários. Este ensaio está padronizado segundo a NBR 9895 (ABNT, 1987).

O índice de suporte Califórnia (ISC) é a relação, em porcentagem, entre a tensão exercida por um pistão de diâmetro padronizado necessária à penetração no solo até determinado ponto (2,5 mm e 5 mm) e a tensão necessária para que o mesmo pistão penetre a mesma quantidade em uma de brita graduada, com dados já padronizados e referenciados nas normas executivas, com limiar de 100 %.

Através do ensaio de CBR é possível conhecer a expansão de um solo sob um pavimento quando este sofrer um processo de saturação e estimar as características do solo, em termos de deformabilidade e suporte, em condições saturadas. Apesar de ter caráter empírico, o ensaio de CBR é mundialmente difundido e serve de base para o dimensionamento de pavimentos flexíveis, pelos métodos empíricos.

2.3.10 Resistência à compressão simples

A resistência à compressão não confinada, também conhecida como resistência à compressa simples, deve ser executada para o estudo de misturas de solos com materiais estabilizantes. No caso desse estudo, seguiu-se a norma técnica NBR 12025 (ABNT,

2012). Esse parâmetro fornece a resistência ao cisalhamento do solo para baixas tensões totais. Sua determinação em laboratório, com finalidades rodoviárias, inicia-se pela compactação do solo, seja por carregamento estático ou dinâmico, em três ou cinco camadas, a depender da energia de compactação utilizada. Posteriormente, rompem-se os corpos de prova assim confeccionados, em prensa de compressão simples (lembrando que para efeito de dosagem de solo-cimento é recomendado um período de cura de 7 dias, em câmara úmida à temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar não inferior a 95%).

O ensaio de resistência à compressão simples é corriqueiramente usado na avaliação de ganhos de resistência em solos estabilizados com algum aditivo químico, como cal e o cimento, por exemplo, pela sua facilidade, rapidez e pouca demanda de material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: 1984: Solo: Determinação do Limite de Liquidez – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 06p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: 1984: Solo: Massa Específica Real dos Grãos. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 08p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: 1984: Solo: Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 03p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: 1984: Solo: Análise Granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: 1986: Solo: Ensaio de Compactação de Solos. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7207**: 1982: Pavimentação: Terminologia e Classificação de Pavimentação. Rio de Janeiro: ABNT, 1982. 03p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895**: 1987: Solo: Ensaio do Índice de Suporte Califórnia. Rio de Janeiro: ABNT, 1987. 14p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12025**: 2012: Solo-cimento: Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 02p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545**: 2000: Solo: Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de Solos Argilosos a Carga Variável. Rio de Janeiro: ABNT, 2000. 12p.

ARAÚJO, C. B. **Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro**. 2006. 136 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em engenharia civil) - COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

BACCI, D.C.; LANDIM, P. M. B. e ESTON, S M. Aspectos e Impactos ambientais de pedreira em área urbana. **Revista da Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 59, p. 47-54, 2006.

BASTOS JÚNIOR, G. M. **Uso de Analisadores Químicos Online para Controle de Processos na Concentração de Minérios de Ferro**. 2010. 103 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-Graduação Lato Senso em Beneficiamento Mineral) – Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

CAMPANHA, A. **Caracterização de Minério de Ferro Para Uso Em Pavimentação**. 2011. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 2011.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 203**: 1994: Solo-Cimento: Determinação da Durabilidade Através da Perda de Massa por Molhagem e Secagem. Rio de Janeiro: DNER, 1994b, 4p.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-CLA 259**: 1996: Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura. Rio de Janeiro: DNER, 1996. 6p.

Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes. **Manual de Pavimentação**: 2006: DNIT, Publicação IPR-719. 2ª edição, Rio de Janeiro, 2006. 274 p.

ESPÓSITO, T. J. **Controle Geotécnico da Construção de Barragens de Rejeito – Análise da Estabilidade de Taludes e Estudos de Percolação**. 2005. 180 f.. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

FONTES, C. M. A. **Utilização das Cinzas de Lodo de Esgoto e de Resíduo Sólido Urbano em Concretos de Alto Desempenho**. 2008. 294 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – COOPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

KNOP, Alexandre. **Encapsulamento De Solos Contaminados Por Hidrocarbonetos**. 2003. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003

LAGE, E. A. **Separadores Magnéticos: Experiência Em Minério De Ferro Na Herculano Mineração**. 2010. 28 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-Graduação

em Engenharia Mineral) – Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.

MATOS, T. H. C. **Caracterização hidromecânica do fosfogesso e das misturas solo-fosfogesso**. 2011. 140 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

MEDINA, J. **Estabilização de Solos** (Apostila) - COPPE/UFRJ. 1987.

NEVES, Eduardo N. S. A. C. **Estudo laboratorial de solos tratados com cal: modelos de comportamento**. 2009. 156 f. Dissertação (Mestrado em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.

NOGAMI, J.S., VILLIBOR, D.F. Caracterização e Classificação Gerais de Solos para Pavimentação: Limitações do Método Tradicional, Apresentação de uma Nova Sistemática. In: 15ª Reunião Anual de Pavimentação, 1980, Belo Horizonte. **Anais... RAPv**, 1980. 38p.

OLIVEIRA, C. G. **Avaliação da Separação Magnética com Rejeito Final das Espirais de Água Limpa**. 2010. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-Graduação Lato Sensu em Beneficiamento Mineral) – Departamento de engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

OLIVEIRA, P. S. **Rotas para Recuperação de Ferro Fino Contido no Underflow do Espessador de Lama da Usina de Conceição**. 2006. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Departamento de engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

PARSONS, A. W. **The Rapid Measurement of the Moisture Condition of Earthwork Material**. LR 750. Transport and Road Research Laboratory. Crowthorne, UK, 1976.

PINTO, A. R. A. G. **Fibras de Carauá e Sisal como Reforço em Matrizes de Solo**. 2008. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

PINTO, S. S. S. **Caracterização das propriedades físicas e mecânicas de misturas de diferentes tipos de rejeito para aplicação em pavimentos**. 2013. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

SALOMÃO, F. X. e ANTUNES F.S. **Solos em Pedologia – Geologia de Engenharia**, Oliveira S. A. & Brito S. A. (eds.), Associação Brasileira de Geologia de Engenharia - ABGE, São Paulo, Brasil, pp. 87-99, 1998.

SILVA, J. P. S. Impactos ambientais causados pela mineração. **Revista Espaço da Sophia**, Tomazina, n. 08, p. 29 – 48, nov., 2007.

SÓRIA, M. H. A. e FABRI, G. T. P. O Ensaio Mini-MCV – Um Ensaio de MCV, Moisture Condition Value, cm Corpos de prova de Dimensões Reduzidas. In: 15ª Reunião Anual de Pavimentação, 1980, Belo Horizonte. **Anais... RAPv**, 1980. p. 01-22.

WILLS, B. A. e Napier-Munn, T. J. **Mineral Processing Technology**. 7^a ed. [S.I.]: Elsevier Science & Technology Books,. Cap. 2, p. 30-38. 2006.

PROPRIEDADES HIDROMECÂNICAS DE MISTURAS DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO MELHORADAS COM CIMENTO PORTLAND

RESUMO

No presente trabalho estudaram-se as propriedades hidromecânicas de uma mistura entre dois rejeitos de minério de ferro, melhoradas com 5 % de cimento. Estes resultados são importantes para caracterizar o comportamento das misturas face às ações da água na natureza, principalmente pelo fato de que se objetiva destinar as misturas em aplicações de enchimento de aterro e camadas de pavimento rodoviário. Através dos resultados obtidos em laboratório verifica-se que a mistura entre os rejeitos sem cimento não possui estabilidade superficial em água, nem durabilidade quando analisada, contudo, o melhoramento com 5 % de cimento permite aplicar a mistura tanto em enchimento de aterro como em camadas de pavimento rodoviário, exceto para camada de base. Ainda verificou-se, intuitivamente, que a adição de maiores porcentagens de cimento, ou seja, uma mistura estabilizada, permitirá obter melhores resultados, possibilitando aplicação da mistura estudada também em camada de base de pavimento rodoviário.

Palavras-chave: Estabilização química, Rejeito de Flotação, Rejeito de Concentração Magnética, Estabilidade Superficial.

ABSTRACT

This study examined the hydro-mechanical properties of a mixture containing iron ore tailings improved with 5% cement. These results are important to characterize the behavior of mixtures considering the actions of water in nature, mainly because it aims to allocate the mixtures in applications of filling embankments and layers of road pavement. The results obtained in the laboratory indicate that the mixing of tailings without surface has no surface stability in water or durability, however, the addition of 5% cement allows applying the mixture to both in filling embankments and in layers of road pavements, except for the base layer. Also, intuitively, it was verified that adding higher percentages of cement, that is, a stabilized mixture, will provide best results, allowing the application of the mixture studied in the base layer of the road pavement.

Key words: Chemical stabilization, Flotation tailing, Magnetic Concentration tailing, Surface Stability in water

INTRODUÇÃO

Considerações gerais

Existem diversos órgãos mundiais preocupados com o meio ambiente, como Banco Mundial, Organização das Nações Unidas, Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), entre outros. Desde a criação do conceito de desenvolvimento sustentável, adotado oficialmente em 1987, com a imposição de novas leis e normas de caráter ambiental e de uma maior rigidez, vem-se incentivando que os projetos de engenharia contemplem os conceitos de sustentabilidade com o objetivo de proteger o meio ambiente (CMMAD, 1988).

A utilização de materiais alternativos, resíduos, na Engenharia Civil, geralmente está ligada a dois fatores, o primeiro, relaciona-se à escassez de materiais de qualidade na natureza que se enquadrem nos parâmetros exigentes das especificações e normas técnicas vigentes, como, por exemplo, agregados oriundos de jazidas no caso das obras de pavimentação, e o segundo se deve ao fato de que os materiais alternativos quase sempre estão dispostos na natureza de forma a impactar de forma negativa o ambiente. Por tanto, soluções que permitam o aproveitamento de resíduos como materiais alternativos estão configurados no que se pode chamar de engenharia sustentável. Vale ressaltar que empregos de resíduos, como materiais alternativos, na Engenharia Civil, particularmente, em obras geotécnicas, buscam um equilíbrio entre a técnica executiva e o meio ambiente, para objetivar a sustentabilidade.

O setor de mineração produz uma enorme quantidade de resíduos que são dispostos em pilhas de estéreis e barragens de rejeito. Uma preocupação deste setor refere-se ao grande espaço na natureza necessário para reter a enorme quantidade de rejeito gerado, configurando em grandes impactos ambientais negativos, fazendo com que esse setor econômico busque incessantemente soluções que visem à diminuição da quantidade de resíduos gerados e busque dar outras destinações aos resíduos, que permitam o seu aproveitamento como materiais alternativos em obras de engenharia.

Neste contexto, Campanha (2011) e colaboradores deram início a pesquisas que buscam o aproveitamento de resíduos de minério de ferro como material alternativo para serem aplicados em camadas de pavimentos rodoviários. Dando continuidade a estas proposições, buscou-se estudar diferentes misturas destes resíduos melhoradas

com cimento, visando compreender como esse material na referida condição se comporta quando exposto a ação hidráulica da água, verificando o seu comportamento, sobretudo do ponto de vista dos parâmetros de durabilidade e estabilidade mecânica. Assim estudos hidromecânicos permitem vislumbrar o comportamento de misturas de minério de ferro melhoradas com cimento Portland, visando o seu emprego em camadas de pavimentos rodoviários ou como material de enchimento, no caso de aterros.

Segundo Bastos et al (2000), a erodibilidade é a maior ou menor facilidade com que as partículas do solo são destacadas e transportadas pela ação de um agente erosivo. Sob esta ótica, neste trabalho estudou-se a erodibilidade e os parâmetros de durabilidade e estabilidade mecânica que são essenciais para que misturas compostas de materiais alternativos tenham viabilidade técnica para emprego em obras de engenharia.

Neste trabalho, foram utilizados dois resíduos obtidos no processo de beneficiamento de minério de ferro. Um dos rejeitos é gerado no processo de flotação, que trata-se de um procedimento que utiliza propriedades físico-químicas para retirar sílica do minério de ferro. O outro, obtido no processo de concentração magnética, que visa separar magnetita e hematita de quartzo, por meio de propriedades magnéticas.

Diante do exposto, esse estudo visa conceber uma mistura de rejeitos de minério de ferro, oriundos dos processos de beneficiamento por flotação e concentração magnética, e cimento Portland que atenda às especificações técnicas de camadas de pavimentos rodoviários flexíveis constantes principalmente nas páginas 136 e 142 do Manual de Pavimentação, DNIT (2006), pelos parâmetros de CBR, expansão e limites de consistência, além de analisar o efeito do cimento Portland na mistura desses rejeitos de minério de ferro sobre os parâmetros de estabilidade mecânica e durabilidade, de acordo com a NBR 12253 (ABNT 2012a) e NBR 11798, (ABNT, 2012b).

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

Rejeitos de minério de ferro

Trabalhou-se com rejeitos de minério de ferro oriundos dos processos de beneficiamento por flotação e concentração magnética, ambos disponibilizados pela

empresa Vale S/A, originários da Mina Alegria, localizada no município de Mariana-MG. O rejeito do processo de flotação foi caracterizado como material granular classificado pelo sistema de classificação TRB (*Transportation Research Board*) como A-4(3). O rejeito do processo de concentração magnética foi caracterizado também como material granular e classificado pelo sistema de classificação TRB como A-3(0). A caracterização física desses rejeitos de minério de ferro é apresentada na Tabela 01.

Estabilizante químico

Como estabilizante químico, empregou-se o cimento CP-II-E-32, fabricado pela Companhia de Cimento Vale do Paraíba, conhecida comercialmente como Tupi. As características químicas segundo a norma técnica NBR 11578 (ABNT, 1991) devem atender aos seguintes valores máximos: 94 % de clínquer e sulfatos de cálcio, 34 % de escória de alto-forno e 10 % de material carbonático (filler), com adição de sulfato de cálcio entre 1 % a 4 % como regulador de pega.

Métodos

Estudos geotécnicos dos materiais

Os procedimentos para o processamento dos rejeitos foram: secagem das amostras ao ar seguido de peneiramento na peneira #4 (4,8 mm) com objetivo de homogeneização. Posteriormente, os rejeitos foram armazenados em tonéis plásticos devidamente identificados. As amostras dos rejeitos de minério de ferro e suas misturas foram empregadas em ensaios geotécnicos que abrangeram as seguintes determinações: (i) limites de consistência, conforme os métodos de ensaio ME 082 e ME 122 (DNER, 1994a,b), (ii) granulometria conjunta, conforme o método de ensaio ME 051 (DNER, 1994c), (iii) compactação nas energias do Proctor Normal e Intermediário, conforme a norma técnica NBR 7182 (ABNT, 1986), obtendo-se os parâmetros ótimos de compactação ($W_{ót}$ e $\gamma_{dmáx}$). Após a determinação da umidade ótima de cada material, executa-se a molhagem dos rejeitos e das misturas desses para confecção dos corpos de prova, que foram utilizados nos seguintes ensaios de laboratório: (iv) imersão de corpos de prova de acordo com MATOS (2011), (vi) durabilidade por molhagem e secagem,

conforme o método de ensaio ME 203 (DNER, 1994d) e (vii) permeabilidade a carga variável, conforme a norma técnica NBR 14545 (ABNT, 2000). Para realização do ensaio de (v) Perda de massa por imersão, realizou-se a compactação Mini-MCV, segundo a metodologia MCT (Miniatura Compactada Tropical).

Os ensaios desenvolvidos neste trabalho são descritos a seguir.

Ensaio de Compactação (NBR-7182 1986). As compactações dos corpos de prova foram realizadas nas energias dos ensaios Proctor Normal e intermediário, segundo a metodologia descrita na Norma Técnica NBR-7182 (ABNT, 1986), para determinação do peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e da umidade ótima (w_{ot}), retiradas da curva de compactação.

Imersão de Corpos de prova. Consiste em fazer com que os corpos de prova fiquem inundados com o objetivo de se avaliar visualmente o seu potencial desagregador ao longo do tempo. Este procedimento apesar de ser uma pratica no meio geotécnico ainda não é normatizado (MATOS, 2011). Os corpo de prova confeccionados com os parâmetros ótimos de compactação foram imersos em uma bacia contendo água de abastecimento público com temperatura próxima a 22 °C. O decorrer do ensaio foi registrado através de fotografias, em que se avaliou o potencial desagregador das misturas ao longo do tempo, quanto a sua a capacidade, no estado não confinado, em sofrer colapso de sua macroestrutura.

Durabilidade por Molhagem e Secagem (DNER-ME 203/94 – 1994d). A durabilidade pode ser definida como sendo a capacidade de um material manter a sua integridade quando submetido à ação de agentes externos (LIMA & ROHM ET AL.1993). Esses ensaios foram executados em conformidade com a Norma DNER-ME 203/94, para solo-cimento, pois não se dispõe, no Brasil, de norma técnica específica para outros tipos de misturas estabilizadas.

Permeabilidade de Carga Variável (NBR-14545 2000). O coeficiente de permeabilidade, grandeza que mede a facilidade com que um fluido escoar através de um meio poroso, neste trabalho, teve sua medida determinada pelo que prescreve a NBR 14545, (ABNT 2000).

Perda de massa por imersão (DNIT CLA 259 -1996). A perda de massa por imersão em água de corpos de prova compactados com solos tropicais em laboratório objetiva a previsão de sua estabilidade superficial à ação das intempéries e a sua classificação MCT.

Dosagens das misturas

Para a realização deste estudo, foi empregada uma mistura composta dos dois rejeitos de minério de ferro apresentados (flotação + concentração), visando obter um material alternativo com propriedades geotécnicas adequadas ao emprego na pavimentação rodoviária e em obras de terra e mais adequado a estes fins, quando comparado com a aplicação individual de cada rejeito.

Para tanto e conforme OLIVEIRA (2013), um estudo realizado e baseado nas propriedades geomecânicas (Compactação, CBR e Resistência à Compressão Simples) possibilitou definir a mistura mais promissora a composta com teores de 60 % do rejeito do processo de flotação e 40 % do rejeito do processo de concentração magnética, em massa seca, doravante denominada mistura 60f-40c. O teor de cimento empregado neste estudo foi de 5 % em relação à massa seca da mistura 60f-40c, quantidade que confere a condição de melhoramento das suas propriedades geotécnicas conforme a técnica de estabilização definida no manual de pavimentação (DNIT, 2006). Para se chegar ao teor de 5 % de cimento Portland, em função da massa seca da mistura dos rejeitos supracitados, analisaram-se as resistências mecânicas, via ensaio de resistência à compressão simples em corpos de provas compactados nas energias do Proctor Normal e intermediário, variando o teor de cimento em 3, 4 e 5 %, sendo o teor de 5 % de cimento, em relação a massa seca da mistura, o que concedeu a melhor resposta quanto à resistência mecânica sendo esta mistura doravante denominada 60f-40c+5%CP-II-E-32.

Para verificar a melhoria das propriedades hidromecânica da referida mistura, realizaram-se os ensaios supracitados também para a mistura 60f-40c, sem adição de cimento.

Moldagens dos corpos de prova

De posse dos parâmetros ótimos de compactação obtidos nas energias do Proctor Normal e Intermediário para a mistura de rejeitos de minério de ferro denominada de 60f-40c com e sem adição de cimento Portland, produziu-se, no teor de umidade ótimo ($W_{ót}$) e peso específico seco máximo (γ_{dmax}), em cilindros metálicos (cilindro de Proctor), corpos de prova para atendimento aos ensaios. Logo após serem compactados, os corpos de prova foram extraídos dos cilindros, pesados, identificados, embalados em sacos plásticos e levados para a câmara climatizada, à temperatura de $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar superior a 95%, onde permaneceram em cura por 7 dias quando estabilizados com cimento. O cimento Portland, para as misturas melhoradas, foi adicionado logo após a homogeneização obtida entre os diferentes rejeitos de minério de ferro, fazendo-se uma nova homogeneização, sendo a água lançada na etapa final. Levando-se em consideração as reações químicas decorrentes do uso de cimento Portland, as misturas foram compactadas logo após a adição de água.

Sequência de trabalho

Inicialmente para a mistura 60f-40c, foram realizados o estudo da sua granulometria e os ensaios de limite de plasticidade e de limite de liquidez, para se obter sua classificação pela TRB. Visando-se aos estudos da estabilidade sobre a ação de água, corpos de prova obtidos conforme mencionado acima foram colocados em imersão, de tal forma que, em pé, tivessem sobre os mesmos uma lamina de água de aproximadamente 1 cm, observando-se, em seguida, o comportamento dos mesmos, por intermédio de fotos sequenciais. Visando-se obter dados numéricos a respeito desta estabilidade e ainda uma verificação do teor de 5 % de cimento previamente definido, executaram-se os ensaios de perda de massa por imersão e de durabilidade por molhagem e secagem. Por último, visando compreender o comportamento dos mesmos no que se refere aos parâmetros de permeabilidade, corpos de prova curados a 7 dias, conforme já descrito, foram submetidos ao ensaio de permeabilidade à carga variável.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme a sequência de ensaios anteriormente descrita, apresentam-se os resultados encontrados e discussões para a mistura 60f-40c com e sem o melhoramento por inclusão de cimento Portland. A Tabela 01 apresenta os resultados dos ensaios de

caracterização física dos rejeitos utilizados na mistura, enquanto a Tabela 02 os resultados para a mistura entre os rejeitos de minério de ferro, denominada de mistura 60f-40c.

Tabela 01 – Caracterização física das amostras de rejeito de minério de ferro

Características físicas		Rejeito de minério de ferro	
		Flotação	Concentração
Peneiramento (% passante)	# 10 (2,00 mm)	100	100
	# 40 (0,425 mm)	96	65
	# 200 (0,075 mm)	49	10
Limites de Attemberg	LP (%)	15	NP
	LL (%)	10	
	IP (%)	5	
Classificação	TRB	A-4(3)	A-3(0)
Argila	(% < 0,002 mm)	2	3
Silte	(0,002 < % ≤ 0,06 mm)	47	7
Areia	(0,006 ≤ % < 2,00 mm)	51	90
Peso específico dos sólidos	γ_s (kN/m ³)	31,76	35,58

Tabela 02 – Caracterização física da mistura 60f-40c.

Características do Material		Amostra
		60f-40c
Peneiramento (% passante)	# 10	100
	# 40	92,6
	# 200	40,8
Limites de Attemberg	LP	NP
	LL	
	IP	
Peso específico dos sólidos	γ_s (kN/m ³)	32,32
Argila	(% < 0,002 mm)	5
Silte	(0,002 < % ≤ 0,06 mm)	36
Areia	(0,006 ≤ % < 2,00 mm)	59

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 02, a mistura 60f-40c pode ser classificada pelo sistema de classificação TRB como sendo um material pertencente ao grupo A-4(1), com características texturais de uma areia-silto-argilosa. O solo típico do grupo A-4 é siltoso não plástico, ou moderadamente plástico, possuindo, geralmente, 5 % ou mais passando na peneira nº 200. Quanto aos valores dos índices de grupo, vão de 1 a 8, salientando-se as percentagens crescentes de material grosso dão origem a valores decrescentes para os índices de grupo (DNIT, 2006).

Se forem comparados os dados constantes na Tabela 02, com os dados dos resíduos individualmente, apresentados na Tabela 01, verifica-se que, segundo as proposições do sistema de classificação TRB, a amostra de rejeito de concentração classificada como A-3(0) teve seu resultado piorado. Entretanto, é válido relatar que a amostra de concentração magnética tende a apresentar resultados inferiores quando comparada à amostra de rejeito de flotação e à mistura 60f-40c, para os ensaios de estabilidade em água, como será visualizado a seguir. O rejeito de flotação teve seu índice de grupo reduzido para 1, em comparação à mistura 60f-40c, o que pela TRB seria um ganho positivo.

Os resultados apresentados na figura 01 permitem verificar que o aumento da energia de compactação é responsável pelo acréscimo dos valores de peso específico aparente seco máximo e redução dos valores de umidade ótima da mistura 60f-40c. Os parâmetros ótimos de compactação encontrados estão condizentes com o comportamento comumente relatado em trabalhos clássicos da Mecânica dos Solos (SOUSA, 1980; PINTO, 2000), para solos granulares, apesar de ter-se encontrado em laboratório certa dificuldade para se executar a compactação destes rejeitos, tanto separados ou quando misturados, caracterizando uma constante exsudação de água ao longo do processo de compactação.

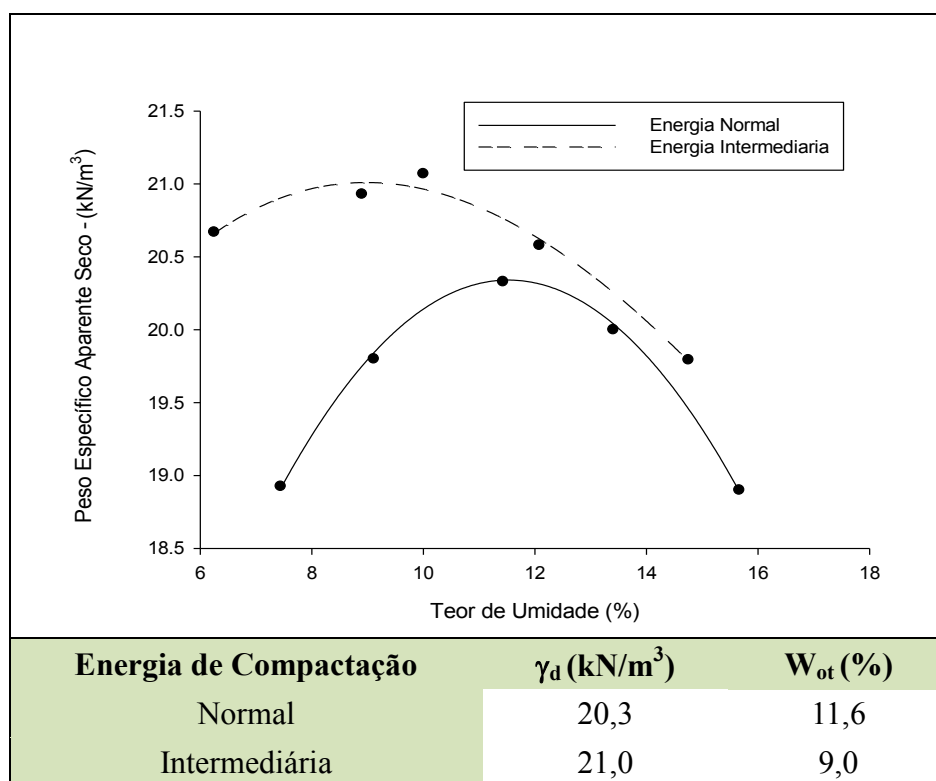


Figura 01 – Parâmetros ótimos e gráfico das curvas de compactação para a mistura 60f-40c.

A Figura 02 apresenta a descrição do comportamento de amostras da mistura 60f-40c, sob condições de umidade ótima de compactação, submetidas ao processo de gradual submersão em água. Os resultados mostram interessantes aspectos do comportamento dos corpos de prova analisados frente ao umedecimento e posterior inundação conforme MATOS (2011).

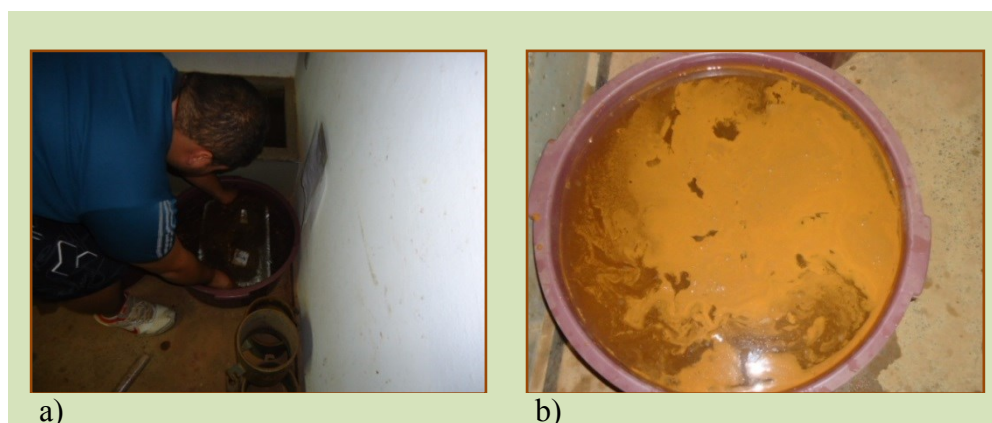


Figura 02 – Imersão de corpos de prova compactados na energia Normal e Intermediária sem adição de cimento. a) Colocação dos Corpos de prova da mistura 60f-40c em imersão; b) aparência dos corpos de prova imersos, após aproximadamente 1 min.

Logo no início da inundação, observou-se a ocorrência de bolhas de ar e uma rápida dissolução, fazendo com que os corpos de prova para a mistura 60f-40c sem adição de cimento, obtidos mesmo na energia Intermediária sofressem um rápido processo de desintegração. Em menos de 2 minutos, o corpo de prova perdeu sua forma para ambas as energias (Normal e Intermediária), não apresentando estabilidade em imersão, conforme pode ser verificado na Figura 03.

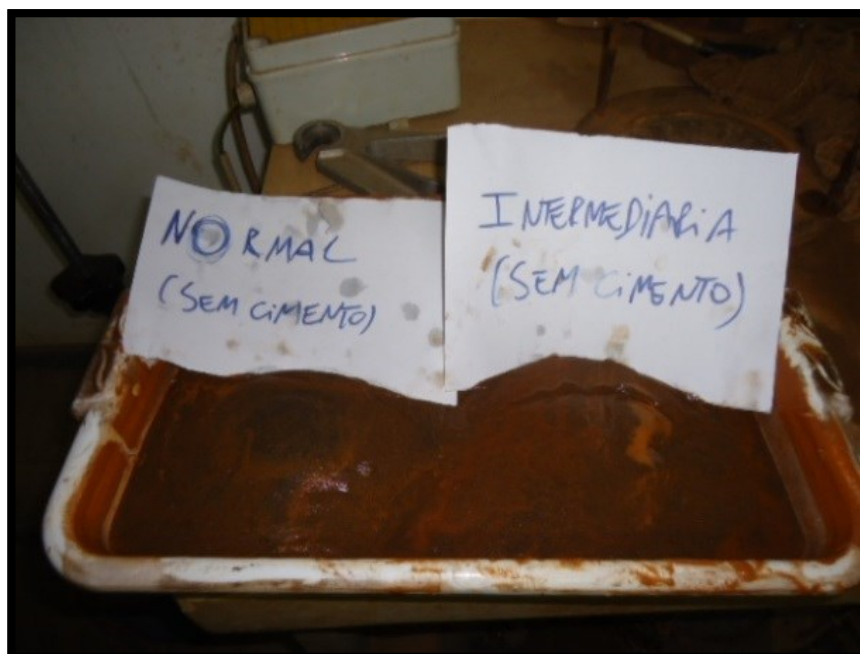


Figura 03 – Estado final dos corpos de prova após decorridos 2 minutos e retirados da bacia de imersão.

Os corpos de prova melhorados com cimento, não experimentaram este processo de perda total da estabilidade em imersão. Mesmo apresentando o mecanismo de ocorrência de bolha e tendo uma ligeira perda de sólidos, apresentaram-se estáveis após 72 horas em imersão, conforme pode ser visto na sequência de imagens da Figura 04. Também se apresenta, na última imagem desta sequência de fotos, o resultado para mais uma tentativa realizada com um corpo de prova obtido da energia Intermediária para a mistura 60f-40c sem adição de cimento, posta em imersão pouco antes de se completar as 72 horas, conforme anteriormente relatado.

Conforme pode ser visualizado na última imagem, registrada dia 10/08/2012, os corpos de prova foram retirados da imersão e identificados, onde se observa que tanto a mistura compactada e melhorada com cimento na energia Normal, bem como na energia Intermediária, apresentaram estabilidade superficial em imersão, apesar de ser visível ao longo dos dias a perda ou o desprendimento de partículas sólidas. Também se observa que o corpo de prova compactado na energia Intermediária, mas sem adição de cimento, numa nova tentativa, novamente não apresentou estabilidade em imersão.

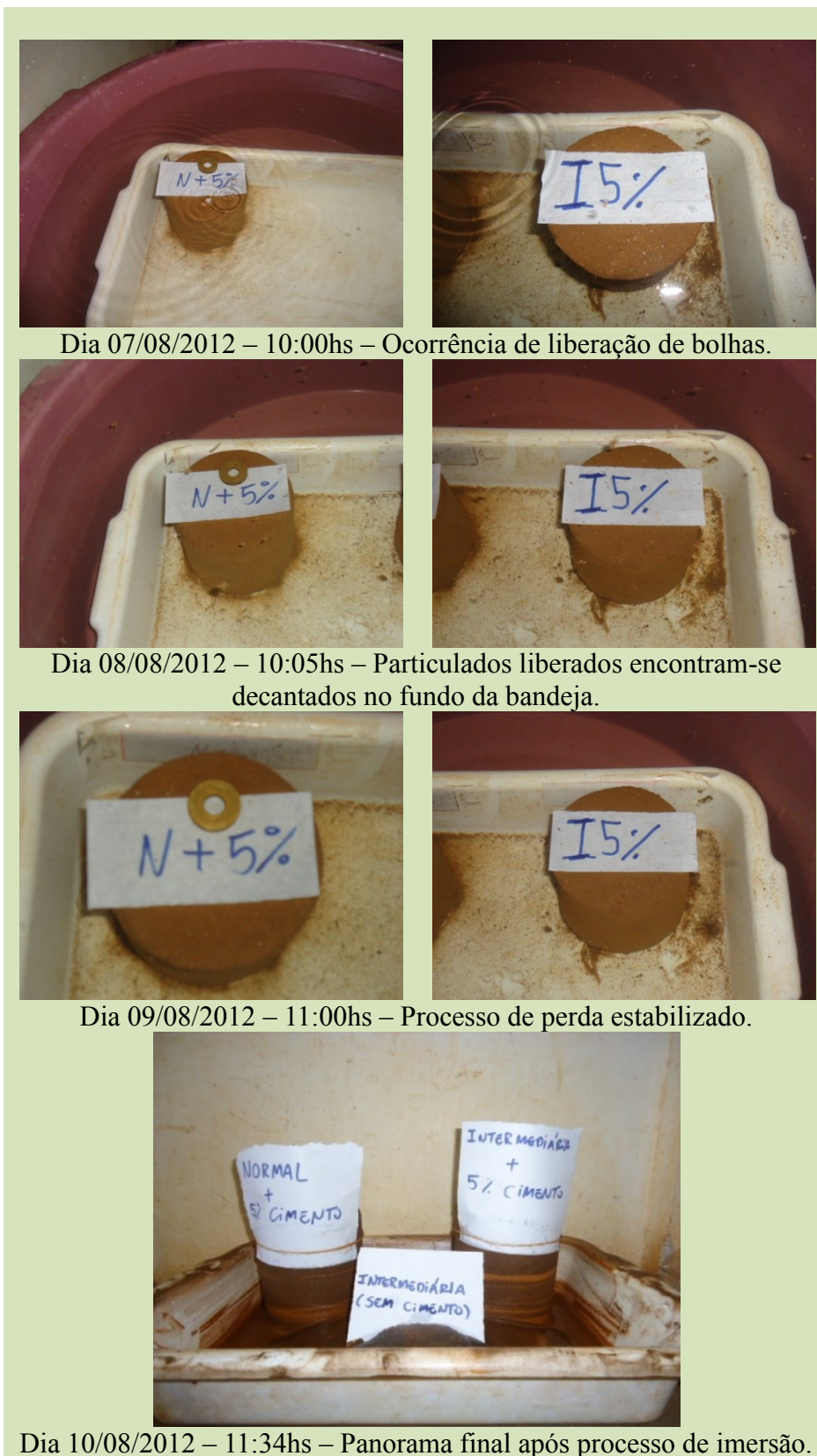


Figura 04 – Sequência de imagens na avaliação da imersão dos corpos de prova.

Através dos resultados do ensaio de perda de massa por imersão em água apresentados na Tabela 03, conforme a metodologia MCT, verificou-se que a mistura 60f-40c no seu estado natural, sem adição de cimento, não apresentou estabilidade

superficial referente à ação hidromecânica da água, o que fica evidenciado pela grande perda de massa ocorrida. Vê-se que a mistura 60f-40c+5%CP-II-E-32, cujos corpos de prova foram curados a 7 dias em câmara aclimatizada, antes de sua imersão, apresentou uma perda de massa bem inferior, em média, aproximadamente, 111 % a menos, comportamento que pode ser observado na Figura 05. As perdas de massa superiores a 100% encontradas para a mistura de rejeitos de minério de ferro sem adição de cimento justificam-se pelo fato de que os cálculos da perda de massa são relativos a massa de solo extrudada, ou seja, é referente a massa do corpo de prova que fica exposto 1,0 cm para fora do cilindro de compactação Mini-MCV. Assim, como a erodibilidade superficial ocasionada no desprendimento de partículas sólidas foi superior ao comprimento de 1,0 cm extrudado, a massa desprendida foi superior à massa extrudada.

Na Figura 05 e na Tabela 03, pode-se observar claramente a diferença nos valores de perda de massa por imersão em água para a mistura de rejeitos de minério de ferro sem e com a adição de cimento Portland. Observa-se que para estes materiais a influência do teor de umidade sobre essa estabilidade possui uma relação direta quando a mistura está melhorada com cimento, onde a perda de massa por imersão cresce com o aumento do teor de umidade, já para a mistura 60f-40c o mesmo não é observado visto que as perdas de massa por imersão variam independente da umidade.

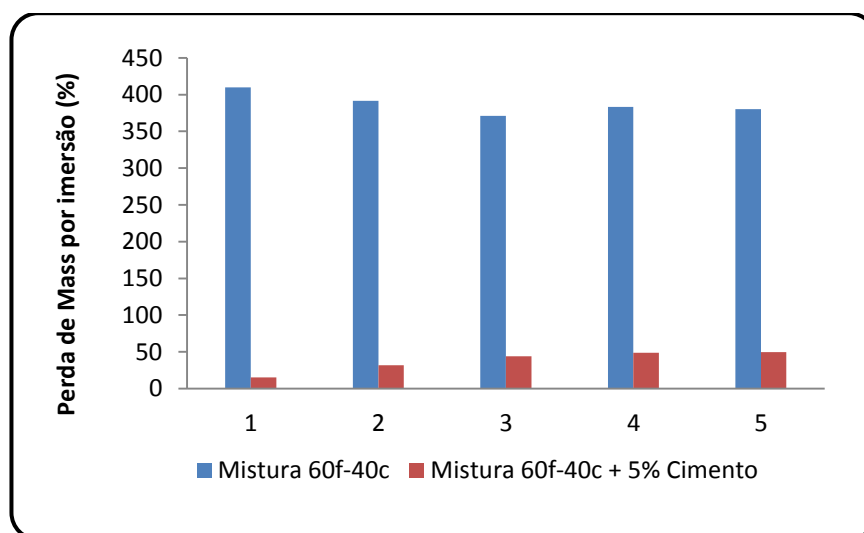


Figura 05 – Perda de massa em imersão para as diferentes misturas

Tabela 03 – Resultado dos ensaios de perda de massa por imersão segundo a Metodologia MCT.

Parâmetros do ensaio	MISTURA 60f-40c (SEM CIMENTO)				
	Amostra				
	01	02	03	04	05
Teor de umidade médio (%)	5,29	7,56	9,85	11,42	12,75
Massa específica aparente seca (g/cm ³) – referente a 12 golpes	1,68	1,74	1,76	1,76	1,77
Massa extrudada (g)	36,49	37,56	38,28	35,49	34,86
Massa desprendida (g)	149,57	147,09	142,03	136,04	132,57
Fator de correção	1	1	1	1	1
Perda de Massa por Imersão (%)	409,90	391,57	371,02	383,23	380,33
-	60f-40c+5%CP-II-E-32 (COM CIMENTO)				
Teor de umidade médio (%)	3,58	5,68	7,89	9,96	11,94
Massa específica aparente seca (g/cm ³) – referente a 12 golpes	1,59	1,60	1,68	1,64	1,60
Massa extrudada (g)	37,09	38,33	36,08	33,27	31,49
Massa desprendida (g)	5,67	12,21	15,78	16,22	31,17
Fator de correção	1	1	1	1	0,5
Perda de Massa por Imersão (%)	15,29	31,85	43,74	48,75	49,49

Os resultados apresentados na Tabela 04 revelam que a mistura de rejeitos de minério de ferro melhorada com cimento, tanto a compactada na energia Normal, quanto na energia Intermediária, resistiram aos 12 ciclos do ensaio de durabilidade, enquanto as misturas sem adição de cimento não resistiram ao processo de imersão em água. Contudo, a mistura 60f-40c melhorada com cimento, quando compactada nas energias Normal e Intermediária, apresentou perdas de massa acumulada finais de 48,1 % e 39,1 %, respectivamente. Também se verificou que, com o aumento da energia de compactação, ocorreu uma ligeira redução na perda de massa da referida mistura.

Apesar de ter suportado aos 12 ciclos, a mistura de rejeitos de minério de ferro melhorada com cimento, de acordo com o que estabelece as proposições da ABCP (1980), sobretudo nos requisitos de perda máxima no ensaio de durabilidade constantes na Tabela 05, não atende a estas especificações, pois conforme a Tabela 04, os resultados alcançados superam os limites máximos toleráveis para a perda de massa

máxima de 10 % (Tabela 05), já que a referida mistura é classificada como pertencente ao grupo A-4 do sistema de classificação geotécnica da TRB.

Tabela 04 – Resultados da perda de massa acumulada do ensaio de Durabilidade por molhagem e secagem, conforme o método de ensaio ME 203 (DNER, 1994b).

Ciclo N°	Perda de Massa Acumulada (%)	
	60f-40c + 5%CP-II-E-32	
	Energia de Compactação	
	Normal	Intermediária
1	8,6	8,7
2	15,4	14,3
3	19,4	19,0
4	25,4	23,0
5	29,3	26,5
6	32,7	30,0
7	36,1	33,3
8	37,9	34,6
9	41,5	36,3
10	44,1	37,5
11	46,2	38,2
12	48,1	39,1

Tabela 05 - Perda de massa máxima no ensaio de durabilidade por molhagem e secagem (ABCP, 1980).

Tipo de solo (Grupos e subgrupos do sistema de classificação da TRB)	Perda de massa máxima (%)
A-1, A-2-4, A-2-5 e A-3	14
A-2-6, A-2-7, A-4 e A-5	10
A-6 e A-7	7

Conforme a Tabela 06, para a energia de compactação do Proctor Intermediário, pode-se verificar que as perdas para a mistura de rejeitos de minério de ferro em estudo são superiores a encontrada para o rejeito de minério de ferro oriundo do processo de beneficiamento por flotação e inferior à encontrada para o rejeito de minério ferro oriundo do processo de beneficiamento por concentração magnética.

Tabela 06 – Perda de massa para mistura 60f-40c com 5% de cimento x Perda de massa para os rejeitos de minério de ferro individuais com 5% de cimento – Energia Intermediária.

Energia de Compactação	Material	Perda de massa máxima (%)
Intermediária	60f-40c + 5%CP-II-E-32	39,1
	Rejeito de Flotação com adição de 5% de cimento*	19,5
	Rejeito de concentração magnética com adição de 5% de cimento*	41,5

*Resultados obtidos por CAMPANHA, (2011).

De modo a avaliar como a adição do cimento à mistura 60f-40c interfere no fluxo de água através deste, o ensaio de permeabilidade foi realizado para a mistura com e sem adição de cimento. Durante o processo de saturação, foi observado que os tempos de saturação para as amostras obedeceram à ordem do coeficiente de permeabilidade, ou seja, quanto mais permeável o material, menor o tempo para saturação. A Tabela 07 apresenta os valores dos coeficientes de permeabilidade a 20 °C à carga variável.

Tabela 07 - Coeficientes de permeabilidade a 20 °C (Carga Variável).

Amostra	Energia de Compactação	k (20°C) cm/s
60f-40c	Intermediária	$2,88 \times 10^{-4}$
60f-40c + 5%CP-II-E-32	Intermediária	$1,77 \times 10^{-4}$
60f-40c	Normal	$3,34 \times 10^{-4}$
60f-40c+ 5%CP-II-E-32	Normal	$2,98 \times 10^{-4}$

Com relação aos resultados de coeficiente de permeabilidade, a 20 °C, apresentados na Tabela 08, é possível verificar que estes coeficientes de permeabilidade, ao serem comparados entre si, apresentam a mesma tendência quando da adição de 5 % de cimento. Portanto, existe um leve declínio da permeabilidade, tanto para a energia de compactação Normal, quanto para a energia Intermediária, embora a ordem de grandeza encontrada para os coeficientes de permeabilidade esteja condizente com o que diz a Mecânica dos Solos para os materiais granulares.

Observa-se, também, que os menores coeficientes de permeabilidade obtidos foram para as misturas na energia Intermediária. Este comportamento é explicado pelo índice de vazios, que é menor nesta energia, haja vista que o incremento de energia para

um mesmo material, segundo BENSON et al. (1994), DANIEL (1984) e MITCHELL et al. (1965), permite, em escala macroscópica, visualizar a ocorrência de quebra de agregados e eliminação de poros inter-agregados, e, em escala microscópica uma reorientação das partículas e diminuição dos poros interpartículas, culminando na diminuição do índice de vazios.

CONCLUSÕES

Diante dos resultados encontrados, pode-se afirmar que a mistura de rejeitos de minério de ferro, denominada de mistura 60f-40c sem adição de cimento, não possui estabilidade superficial em água, caracterizada pela alta erodibilidade observada, o que pode acarretar, no campo, processos de instabilidade e perda de sólidos configurada em dispersão de partículas sólidas na natureza, situação que a descredencia para aplicação em obras geotécnicas de aterro, ou camadas de pavimentos rodoviários flexíveis.

A mistura 60f-40c melhorada com cimento apresentou estabilidade superficial e o seu uso como material de enchimento em aterro é possível, pois também apresenta conforme OLIVEIRA (2013), $ISC > 2\%$ e expansão $< 4\%$ atendendo portanto o que prescreve a especificação ES108, DNIT (2009). Em camadas de pavimentos rodoviários flexíveis, a mistura 60f-40c com adição de 5 % de cimento pode ser aplicada, tendo em vista que conforme OLIVEIRA (2013) possui $ISC > 30\%$, expansão $< 0,5\%$ além de estar em conformidade aos parâmetros especificados pelo DNIT (2006), excetuando-se a camada de base que exige requisitos técnicos que a mistura 60f-40c com adição de 5 % de cimento não apresenta, haja vista que para o ensaio de durabilidade a perda máxima foi superior a 10%, não atendendo, portanto o que prescreve ABCP (1980).

Sob o ponto de vista da durabilidade dos corpos de prova ensaiados e em relação ao desempenho da mistura de rejeito de minério de ferro analisada, é natural pensar que melhores resultados podem ser alcançados trabalhando-se com percentuais maiores de cimento, ou seja, tendo uma mistura estabilizada ao invés de melhorada. Contudo, deve-se atentar para as condições de viabilidade econômica, pois a inserção de quantitativos maiores que 5 % pode inviabilizar a utilização da mistura proposta em condições reais de campo.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG pelo apoio financeiro ao primeiro autor na realização desta pesquisa e à empresa Vale S.A pelo fornecimento dos rejeitos de minério de ferro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Dosagem das misturas de solo-cimento. Normas de dosagem e métodos de ensaios.** São Paulo: ABCP, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12253:** 2012: Solo-cimento: Dosagem para emprego como camada de pavimento: Procedimento. Rio de Janeiro, ABNT, 2012a. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11798:** 2012: Base de solo-cimento: Materiais para base de solo-cimento. Requisitos. Rio de Janeiro, ABNT, 2012b. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545:** Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável: Método de ensaio. Rio de Janeiro, ABNT, 2000. 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578:** Cimento Portland composto - Especificação. Rio de Janeiro. ABNT, 1991. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182:** Solo: Ensaio de Compactação de Solos: Método de ensaio. Rio de Janeiro, ABNT, 1986. 10p.

BASTOS, C. A. B., MILITITSKY, J. e Gehling ,W. A avaliação da erodibilidade dos solos sob o enfoque geotécnico – pesquisas e tendências. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Revista Online, Porto Alegre, Nº. 1, p.17-25, 2000.

BENSON, C. H., HARDIANTO, F. S. and MOTAN, E. S., Representative Specimen Size for Hydraulic Conductivity Assessment of Compacted Soil Liners. **Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil**, ASTM. Philadelphia 1994.

CAMPANHA, A. **Caracterização de minério de ferro para uso em pavimentação.** 2011. 104 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Departament de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. **Nosso futuro comum.** Relatório Brundtland, Fundação Getúlio Vargas. Rio de Janeiro, CMMAD, 1988.

DANIEL, D. E., Predicting Hydraulic Conductivity of Clay Liners. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, Canada, Vol. 110, 1984.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 082**: 1994: Solos: Determinação do limite de plasticidade: Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNER, 1994a. 3 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 122**: 1994: Solos: Determinação do limite de liquidez: Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNER, 1994b. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 051**: 1994: Solos: análise granulométrica: Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNER, 1994c. 4 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 203**: 1994: Solo-cimento: determinação da durabilidade através da perda de massa por molhagem e secagem: Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNER, 1994d. 4 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **CLA 259**: 1996: Solos: classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura: Classificação. Rio de Janeiro: DNIT, 1996. 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. 2006. Rio de Janeiro: DNIT, 2006. 274 p.

DANIEL, D. E., Predicting Hydraulic Conductivity of Clay Liners. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, Canada, Vol. 110, 1984.

MATOS, T. H. C. **Caracterização hidromecânica do fosfogesso e das misturas solo-fosfogesso**. 2011. 104 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

MITCHELL, J. K. HOOPER, D. R. e CAMPANELLA, R. G. Permeability of compacted clay. **J. Soil mechanics and foundation division**, ASCE, Canada, 91 (4), p. 41-65, 1965.

OLIVEIRA, T. M. **Caracterização de misturas de rejeito de minério de ferro melhoradas com adição de cimento com vistas à aplicação em estradas e aterros**. 2013. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 247 p.

SOUSA, M. L. **Pavimentação rodoviária**. 2. ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1980. 361 p. 1 v.

PROPRIEDADES GEOMECÂNICAS DE MISTURAS DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO MELHORADAS COM CIMENTO PORTLAND

RESUMO

A mineração gera uma enorme quantidade de rejeitos, condicionada a um impacto ambiental. Visando a busca por alternativas de engenharia, com soluções técnicas e ambientalmente mais adequadas, este trabalho tem como objetivo de utilizar rejeito de minério de ferro na construção de pavimentos rodoviários e aterros. Para tal fim estudaram-se as propriedades geomecânicas de misturas de dois rejeitos de minério de ferro, melhoradas com cimento, cujos resultados são importantes para caracterizar o comportamento das misturas face às ações mecânicas a que estão sujeitas a camada estrutural das vias pavimentadas. Os resultados obtidos permitiram relatar que os rejeitos estudados e suas misturas sem adição de cimento apresentam granulometria uniforme, e apesar de apresentarem um valor de CBR que permitiria o seu emprego em camada de sub-base, haveria o risco de surgimento de outras patologias, que comprometeria o seu comportamento mecânico. Entretanto, com a adição de 5 % de cimento, estas misturas apresentaram comportamento compatível para emprego em camadas de sub-base e também para emprego em aterros. Pode-se determinar que a adição de cimento na ordem de 8,5 %, deve ser o ponto inicial para o estudo da mistura dos rejeitos estabilizada, com a finalidade do seu emprego como base de pavimento rodoviário e tal resultado precisa ser verificado experimentalmente em face da consequente retração e da possibilidade de ocorrência de trincas e fissuras nas camadas compactadas.

Palavras-chave: Estabilização química, Rejeitos de minério de ferro, Melhoramento, Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Mining generates enormous amounts of waste, thus causing an environmental impact. Aiming to search for alternatives engineering, technical and more environmentally sound solutions, this study aimed to use iron ore tailings in the construction of road pavements and embankments. To this end, it was investigated the geomechanical properties of mixtures of two iron ore tailings, improved with cement, whose results are important to characterize the behavior of mixtures regarding the mechanical actions that structural layer of paved roads are subjected to. The results allowed observing that the studied tailings and mixtures without addition of cement presented uniform particle size, and despite having a CBR value that allows its use in sub-base layers, there would be the risk of emergence of other situations that compromise the mechanical behavior. However, with the addition of 5% cement, these mixtures showed behavior compatible for use in sub-base layers and embankments. The addition of cement in the range of 8.5% should be the starting point for the study of the mixture of stabilized wastes for use as basis of road pavement and this result needs to be verified experimentally in face of the shrinkage and consequent possibility of cracks and fissures in the compacted layers.

Key words: Chemical stabilization, Iron Ore tailings, Improvement, Mechanical Properties.

INTRODUÇÃO

As mineradoras e siderúrgicas espalhadas por todo território brasileiro têm gerado uma enorme quantidade de resíduos, o que tem se tornado uma preocupação crescente no âmbito das questões ambientais associadas à sua disposição adequada. O grande volume de resíduo gerado desde o processo de extração do minério na natureza até o seu beneficiamento traz para o meio ambiente um enorme impacto ambiental negativo. No caso da mineração, estes resíduos geralmente são armazenados em pilhas de estéril e em barragens de rejeito (CHAMMAS, 1989).

Observa-se no setor minerário uma preocupação cada vez mais com as intervenções ambientais e com a necessidade de se obter soluções tecnológicas que permitam um melhor aproveitamento dos resíduos, visto que já se tornaram escassas e problemáticas na natureza áreas capazes de absorver a enorme quantidade de rejeitos gerados nessa atividade econômica.

Vale salientar que não só o setor minerário, mas toda engenharia mundial ligada às atividades de exploração de recursos minerais, têm sido pressionado para o desenvolvimento de projetos que possam ser considerados ambientalmente sustentáveis. A sustentabilidade visa possibilitar a obtenção contínua das condições iguais ou superiores de vida para um grupo de pessoas e seus sucessores em dado ecossistema (CAVALCANTI, 1995).

As construções de camadas de pavimentos rodoviários e aterros são obras de engenharia que necessitam de um expressivo volume de material que apresentem comportamento geomecânico cujos parâmetros fundamentais atendam às especificações técnicas das normas vigentes. Entretanto, nem sempre é possível obter ocorrências naturais de jazidas de empréstimo, materiais que sejam técnica e economicamente viáveis, e neste sentido muitas vezes faz-se necessário melhorar as suas propriedades de engenharia com técnicas de estabilização de solos ou buscar novos materiais alternativos. Neste contexto as inserções de materiais alternativos, como os rejeitos da indústria de mineração e outros rejeitos industriais, constituem-se em possibilidades de alternativas técnicas e ambientalmente adequadas.

As propriedades geomecânicas são de suma importância na caracterização das misturas compostas de rejeitos de minério de ferro, principalmente, pelo fato de que,

para integrar a estrutura de pavimentos ou de aterros, o material deve atender a determinadas especificações técnicas de projeto relacionadas às propriedades de resistência, deformabilidade e durabilidade, de acordo com o que prescreve, o Manual de Pavimentação, DNIT (2006), bem como as normas ES 302, DNER (1997a), ES 281 DNIT (1997b), ES 108, DNIT (2009b) e ES-T 06, DER/PR (2005).

Os estudos geomecânicos permitem determinar o comportamento de misturas compostas de rejeitos de minério de ferro face aos requisitos geotécnicos de aplicação desses materiais in natura e quando estabilizados com aditivos como o cimento, para serem utilizados em camadas de pavimentos rodoviários ou como material de enchimento em aterros.

Com o propósito de continuidade aos estudos propostos por CAMPANHA (2011) e PINTO (2013) e analisando diferentes misturas compostas por rejeitos de minério de ferro melhoradas com cimento, este trabalho investigou a influência de diferentes teores de cimento na resistência mecânica das referidas misturas, para diferentes tempos de cura, através de ensaios de resistência a compressão não confinada. Analisou-se também a capacidade de suporte destas misturas, frente aos seus parâmetros ótimos de compactação, através do ensaio de CBR (*California Bearing Ratio*).

Diante do exposto, este estudo teve por objetivo contribuir para uma melhor compreensão do comportamento geomecânico de misturas compostas por rejeitos de minério de ferro estabilizadas com cimento, analisando a viabilidade técnica e econômica do uso desse material em pavimentos rodoviários e obras de aterros. Também foi avaliada a dosagem de misturas compostas por rejeitos de minério ferro, as quais foram estabilizadas com cimento, buscando-se alcançar as melhores respostas mecânicas em função das propriedades geomecânicas analisadas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

Rejeito de minério de ferro

Trabalhou-se com dois rejeitos de minério de ferro disponibilizados pela empresa Vale S/A, oriundos da Mina Alegria, localizada no município de Mariana, MG. Os rejeitos foram amostrados no processo de beneficiamento, sendo então denominados

rejeito de flotação, o qual foi gerado pelos hidrociclones no processo de separação dos minerais por flotação, e o rejeito de concentração magnética, o qual foi obtido no cone desaguador dos rejeitos de concentração magnética. Assim, doravante, os resíduos estudados serão tratados como rejeitos de flotação e concentração. O rejeito de flotação trata-se de um material granular classificado pelo sistema de classificação da TRB (*Transportation Research Board*) como pertencente ao grupo A-4(3), enquanto o rejeito de concentração magnética foi classificado como pertencente ao grupo A-3(0). As caracterizações físicas desses rejeitos de minério de ferro são apresentadas na Tabela 01.

Tabela 01 – Caracterização geotécnica das amostras de rejeitos de minério de ferro analisadas.

Caracterização física		Amostra	
		Flotação	Concentração
Peneiramento (% passante)	# 10 (2,0 mm)	100	100
	# 40 (0,425 mm)	96	65
	# 200 (0,075 mm)	49	10
Limites de Attemberg	LP (%)	15	NP
	LL (%)	10	
	IP (%)	5	
Peso específico dos sólidos	γ_s (kN/m ³)	31,76	35,58
Classificação	TRB	A-4(3)	A-3(0)
Argila	(% < 0,002 mm)	2	3
Silte	(0,002 < % ≤ 0,06 mm)	47	7
Areia	(0,006 ≤ % < 2,00 mm)	51	90

Estabilizante químico

Empregou-se como estabilizante químico o cimento Portland CP-II-E-32, fabricado pela Companhia de Cimento Vale do Paraíba, conhecida comercialmente como Tupi, cujas características químicas, segundo a NBR 11578 (ABNT, 1991), devem ser constituídas de valores máximos de 94 % de clínquer e sulfatos de cálcio, 34 % de escória de alto-forno e 10 % de material carbonático (filler), com adição de sulfato de cálcio entre 1 % a 4 % como regulador de pega.

Métodos

Estudos geotécnicos dos materiais

Na fase inicial de preparação dos rejeitos foram realizadas as seguintes etapas: secagem das amostras ao ar e a sombra, e na sequência foi realizado o peneiramento com a peneira número #4 (4,8 mm) com objetivo de homogeneização. Posteriormente, os rejeitos de minério de ferro foram armazenados em tonéis plásticos devidamente identificados. Em seguida, cada uma das amostras de rejeito de minério de ferro foi caracterizada geotecnicamente por meio dos seguintes ensaios de laboratório: (i) limites de consistência, conforme o método de ensaio ME 082 e ME 122 (DNER, 1994a,b), (ii) massa específica dos sólidos, de acordo com a norma técnica NBR-6508 (ABNT, 1984) e (iii) granulometria conjunta, conforme o método de ensaio ME 051 (DNER, 1994e).

Também, realizou-se o ensaio de compactação na energia do Proctor Normal, conforme a norma técnica NBR 7182 (ABNT, 1986), para misturas com diferentes teores de rejeitos de minério de ferro, obtendo-se os parâmetros ótimos de compactação que foram utilizados nos ensaios CBR (Califórnia Bearing Ratio), sendo que a mistura com a melhor resposta em termos de resistência mecânica obtida nesse ensaio foi considerada como mistura ótima, sendo então caracterizada quanto à resistência a compressão não confinada, conforme a norma técnica NBR 12025 (ABNT, 2012c), adicionando-se diferentes teores de cimento e diferentes tempos de cura. A mistura de rejeitos de minério de ferro considerada ótima quando melhorada com diferentes teores de cimento teve suas resistências mecânicas avaliadas segundo o ensaio CBR e foi classificada geotecnicamente, de acordo com a Metodologia MCT, seguindo a orientação do método de classificação CLA 259 (DNER, 1996), sendo necessária a realização dos seguintes ensaios: (v) perda de massa por imersão, de acordo com o método de ensaio ME 256 (DNER, 1994c) e compactação Mini-MCV, de acordo com o método de ensaio ME 258 (DNER, 1994d).

Os ensaios realizados neste trabalho seguiram a orientação geral das normas e procedimentos de ensaios descritos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT e pelo Departamento Nacional de infraestrutura e Transportes – DNIT antigo DNER, conforme apresentado abaixo:

Ensaio de Compactação (NBR 7182/86). As compactações dos corpos de prova foram realizadas nas energias dos ensaios Proctor Normal e intermediário, segundo a metodologia descrita na Norma Técnica NBR 7182 (ABNT 1986). Os parâmetros ótimos de compactação, peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e teor de umidade ótimo (w_{ot}), foram obtidos a partir da análise das respectivas curvas de compactação.

Índice de suporte Califórnia ou ensaio CBR (NBR 9895/87). O índice de suporte Califórnia (ISC), também conhecido como ensaio CBR, é a medida de resistência à penetração de um pistão de aço numa amostra compactada e saturada por imersão pelo período de 96 horas. Para essa finalidade, um pistão com seção padronizada penetra na amostra a uma velocidade de 0,127 cm/min. O valor da resistência à penetração é computado em porcentagem, comparando-se a sua resistência a penetração com uma amostra de brita graduada de elevada qualidade que é adotada como padrão de referência em 100 %.

Resistência à Compressão Simples (RCS) (NBR 12025/2012c). Corresponde a um ensaio triaxial rápido com tensão de confinamento nula e por isso também é conhecido como ensaio de compressão não confinada. E a tensão máxima obtida é chamada resistência à compressão simples.

Classificação MCT – (DNIT-CLA 259/96). O procedimento adotado neste trabalho consistiu na aplicação da compactação Mini-MCV e da perda de massa por imersão propostas por (NOGAMI e VILLIBOR, 1980), trata-se de uma classificação dos solos visando verificar as características próprias dos solos lateríticos por intermédio de propriedades mecânicas e hidráulicas.

Dosagens das Misturas

Na realização deste estudo, foi empregada uma mistura composta de rejeitos de minério de ferro provenientes dos processos de beneficiamento por flotação e concentração magnética, visando obter um material final geotecnicamente mais adequado ao emprego em pavimentação rodoviária ou em aterros.

Conforme observado por Campanha (2011), as características granulométricas dos dois rejeitos (rejeito de flotação e rejeito de concentração magnética) poderiam ser

combinadas de forma a obter uma mistura que apresentasse um melhor desempenho geomecânico.

Para tanto, realizou-se o ensaio de compactação na energia do Proctor Normal para diferentes dosagens desses rejeitos de minério de ferro, conforme consta na Tabela 02.

Tabela 02 – Teores de rejeitos de minério de ferro para diferentes misturas, em relação a porcentagem da massa seca.

Teores de rejeitos de minério de ferro		
Misturas	Rejeito de Flotação	Rejeito de Concentração Magnética
01	10% flotação	90% concentração
02	20% flotação	80% concentração
03	30% flotação	70% concentração
04	40% flotação	60% concentração
05	50% flotação	50% concentração
06	60% flotação	40% concentração
07	70% flotação	30% concentração
08	80% flotação	20% concentração
09	90% flotação	10% concentração

Para cada uma das misturas apresentadas na Tabela 02, confeccionaram-se corpos de prova, nos parâmetros ótimos de compactação na energia do Proctor Normal, para execução do ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC). Portanto, a mistura que apresentou a maior capacidade suporte mecânica medida no ensaio CBR foi considerada como a mistura de rejeitos de minério com teores ótimos. A mistura com teores ótimos foi compactada na energia do Proctor Intermediário, obtendo-se os parâmetros ótimos de compactação ($w_{ót}$ e $\gamma_{dmáx}$).

Para a mistura de rejeitos de minério de ferro com teores ótimos, foram moldados corpos de prova, com e sem adição de cimento, nas energias do Proctor Normal e Intermediário, que foram submetidos a ensaios de resistência à compressão não confinada.

Para a adição de cimento na mistura de rejeitos de minério de ferro com teores ótimos de compactação nas energias Normal e Intermediária, adotaram-se as porcentagens de 3 %, 4 % e 5 % de cimento, e períodos de cura de 3, 7 e 28 dias, em câmara úmida à temperatura de $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar superior a 95 %. Para a referida mistura de rejeitos de minério de ferro sem adição de cimento e quando

melhorada com 5 % de cimento, procedeu-se à classificação geotécnica, segundo a metodologia MCT.

Com os resultados dos ensaios de resistência à compressão não confinada, obteve-se a curva empírica de variação da resistência em função do teor de cimento, que foi utilizada para estimar o quantitativo de cimento necessário para se obter a tensão de 2,1 MPa, resistência mínima exigível aos materiais a serem utilizados na execução de camadas de sub-base ou base de pavimentos de solo-cimento, conforme a norma técnica NBR 11798 (ABNT, 2012b).

Para determinação dos incrementos de resistência mecânica provenientes da adição dos teores de cimento relatados sobre as propriedades geomecânicas da mistura 60f-40c, os ensaios supracitados também foram realizados, em corpos de prova dessa mistura sem adição de cimento.

A mistura então denominada 60f-40c, quando aplicada nos ensaios de análise mecânica, com adição de 5% de cimento CII-E-32, será doravante denominada de mistura 60f-40c+5%CII-E-32.

Moldagens dos corpos de prova

A partir dos parâmetros ótimos de compactação obtidos nas energias do Proctor Normal e Intermediário, para a mistura 60f-40c, produziu-se, no teor ótimo de umidade ($W_{ót}$) e peso específico seco máximo ($\gamma_{dmáx}$), por meio de compactação estática, corpos de prova com dimensões médias de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, os quais foram utilizados nos ensaios de resistência à compressão não confinada. Também foram produzidos corpos de prova em moldes cilíndricos, nas energias do Proctor Normal e Intermediário, para os ensaios de CBR utilizando-se a mistura de rejeito de minério de ferro 60f-40c com e sem adição de cimento. A adição do cimento na mistura 60f-40c ocorreu logo após a homogeneização obtida entre os diferentes rejeitos, sendo a água incorporada na etapa final da homogeneização dos compostos. Atentando-se para as reações químicas decorrentes do uso de cimento, sobretudo nas reações de cimentação, as amostras da mistura 60f-40c foram compactadas logo após o adicionamento da água. No caso do ensaio de CBR com amostras da mistura 60f-40c cimentadas, antes de se realizar a imersão do corpo de prova em água por 96 horas visando atender a análise da expansão, as mesmas foram curadas em câmara úmida por 7 dias.

Sequência de trabalho

Inicialmente, para se obter a mistura 60f-40c, foram realizados os ensaios de compactação na energia Normal com as misturas propostas no Tabela 02. Com os seus parâmetros ótimos da curva de compactação, executaram-se ensaios de CBR e o melhor resultado foi tido como a mistura ótima. Para esta mistura ótima, realizou-se uma compactação na energia Intermediária e a partir de então todos os demais ensaios foram realizados tanto na energia Normal como na Intermediária. Objetivando-se a determinação do teor ótimo de cimento necessário para alcançar a resistência de 2,1 MPa, trabalhou-se com corpos de prova confeccionados com 3%, 4% e 5 % de cimento e nos períodos de cura de 3, 7 e 28 dias, de onde obtiveram-se os parâmetros da curva de progresso da resistência, da qual estimou-se o teor de cimento para obter a resistência de 2,1 MPa. Para o teor de 5 % de cimento, melhor resultado técnico e economicamente viável, realizou-se nos parâmetros ótimos de compactação (Normal e Intermediária) e com o cilindro Califórnia, o ensaio de CBR. As misturas com cimento e sem cimento foram classificadas pela metodologia MCT.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 03, encontra-se a caracterização física da mistura de rejeitos de minério de ferro, denominada de mistura 60f-40c, composta de 60 % de rejeito de minério de ferro proveniente do processo de beneficiamento por flotação e 40 % de rejeito de minério de ferro proveniente do processo de beneficiamento por concentração magnética, mistura esta definida como ótima conforme os ensaios apresentados nas sequências abaixo.

Tabela 03 – Caracterização física da mistura de 60f-40c.

Características do Material		Amostra 60f-40c
Peneiramento (% passante)	# 10 (2,0 mm)	100
	# 40 (0,425 mm)	92,6
	# 200 (0,075 mm)	40,8
Limites de Atterberg	LP (%)	NP
	LL (%)	
	IP (%)	
Peso específico dos sólidos	γ_s (kN/m ³)	33,32
Argila	(% < 0,002 mm)	5
Silte	(0,002 < % ≤ 0,06 mm)	36
Areia	(0,006 ≤ % < 2,00 mm)	59

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 03, nota-se que a granulometria da mistura 60f-40c é a de um material com característica textural areno-siltosa, classificado segundo o sistema de classificação da TRB como pertencente ao grupo A-4, apresentando um índice de grupo igual a 1. Ainda segundo o sistema de classificação da TRB e considerando a mistura 60f-40c sem adição de cimento, é possível verificar que o grupo A-4 relaciona-se aos solos siltsos com um comportamento de fraco a bom para emprego em camada de subleito. Diante da classificação TRB encontrada para a mistura é possível verificar que a porcentagem de cimento, em relação à massa seca de solo ou materiais alternativos, necessária para se obter mistura de solo-cimento estabilizada e com resistência mecânica mínima em atendimento as exigências técnicas de projetos estruturais da camada de base de pavimentos flexíveis, inicialmente deve ser da ordem de 7 % segundo a norma técnica NBR 12253 (ABNT, 2012a).

A Tabela 04 apresenta os valores dos parâmetros ótimos de compactação e da capacidade de suporte, obtidos através de ensaios CBR das misturas analisadas, em função de diferentes teores de rejeitos de minério de ferro.

Tabela 04 – Valores dos parâmetros ótimos de compactação e resistência mecânica das misturas analisadas.

Teor de rejeito de minério de ferro							
Energia	Misturas	Rejeito de Concentração Magnética	Rejeito de Flotação	γ_d (kN/m ³)	w _{ot} (%)	CBR (%)	Exp. *
Normal	01	20%	80%	21,33	8,76	5,6	Inferior 0,05%
	02	30%	70%	20,73	11,40	13,8	
	03	40%	60%	20,30	11,59	20,4	
	04	50%	50%	19,86	10,70	17,0	
	05	60%	40%	19,41	11,80	16,0	
	06	70%	30%	19,90	9,55	15,7	
	07	80%	20%	18,62	9,84	11,7	
	08	90%	10%	17,90	7,55	14,9	
Inter.**	01	40%	60%	21,09	9,05	50,0	

*Expansão do ensaio CBR.

** Energia de compactação Intermediária

É possível verificar que a mistura composta por 60 % de rejeito de flotação e 40 % de rejeitos de concentração magnética, em relação à massa seca (mistura 03), conforme destaque na Tabela 04, possui o maior valor de capacidade de suporte (CBR). Entretanto, este valor de CBR (20,4 %) não é expressivamente maior quando

comparado com os valores de CBR obtidos para as misturas 04, 05 e 06. Todas as misturas apresentaram baixa expansibilidade.

Com relação às granulometrias das misturas apresentadas na Tabela 04, verifica-se que ao se aumentarem os teores do rejeito de flotação, as misturas se tornam mais finas quanto ao aspecto textural, e tendem a apresentar um maior valor de umidade ótima, comportamento esse normalmente relatado na literatura técnica para os parâmetros de compactação semelhantes aos encontrados nessa investigação. Em relação ao peso específico aparente seco máximo, esperava-se que os seus valores fossem menores para as misturas granulometricamente mais finas, entretanto, o comportamento apresentado não foi condizente com as características granulométricas, o que pode ser explicado, pelo fato de que o peso específico real dos sólidos dos diferentes rejeitos são pouco divergentes, e consequentemente, numa mistura mais fina, consegue-se introduzir quantitativos maiores de sólidos e com menos vazios, obtendo pesos específicos aparentes maiores. Por fim, também, foi observado que os ensaios de compactação realizados com os rejeitos de minério de ferro utilizados neste estudo apresentaram dificuldades significativas na execução devido ao constante processo de exsudação de água durante as operações de compactação, principalmente para as amostras com teor de umidade acima da umidade ótima. O que obrigou a execução do ensaio, no que se refere o teor de umidade, ser realizada de forma mais criteriosa para obtenção de valores válidos de umidade.

A figura 01 mostra as curvas de compactação e seus respectivos parâmetros ótimos para a mistura com teores ótimos de rejeito de minério de ferro, denominada de mistura 60f-40c, nas energias Normal e Intermediária do ensaio Proctor.

Por entender conforme BUENO, (1996), que para os quantitativos de cimento empregado neste trabalho e de acordo com a textura granulométrica da mistura dos rejeitos, não há variação considerável dos parâmetros ótimos de compactação quando da inclusão de cimento nas misturas, empregou-se no melhoramento da mistura 60f-40c com cimento, a umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo encontrado para a mistura dos rejeitos (60f-40c) apresentados na figura 01.

Pode-se verificar que o aumento da energia de compactação é responsável pelo acréscimo dos valores do peso específico aparente seco máximo e redução dos valores de umidade ótima da referida mistura. Os parâmetros ótimos de compactação

encontrados estão condizentes com o comportamento comumente apresentado na literatura técnica sobre a Mecânica dos Solos para materiais granulares.

A Tabela 05 apresenta os resultados obtidos em ensaios CBR para a mistura 60f-40c, sem adição de cimento, e com adição de cimento e aos 7 dias de cura, nas energias Normal e Intermediária do ensaio Proctor. Para os teores de cimento de 5 % observa-se que houve significativo aumento do valor do CBR e tais valores atendem às especificações técnicas para utilização da mistura em camada de sub-base de pavimentos rodoviários flexíveis, conforme Manual de Pavimentação DNIT (2006).

A adição de cimento nesta mistura teve a finalidade de melhorar as suas propriedades mecânicas e hidráulicas, visto que os rejeitos de minério de ferro analisados apresentam uma distribuição granulométrica uniforme, apresentando um coeficiente de não uniformidade (C_u) variando de 5 a 6 de acordo com as características granulométricas apresentada na tabela 01 e 03.

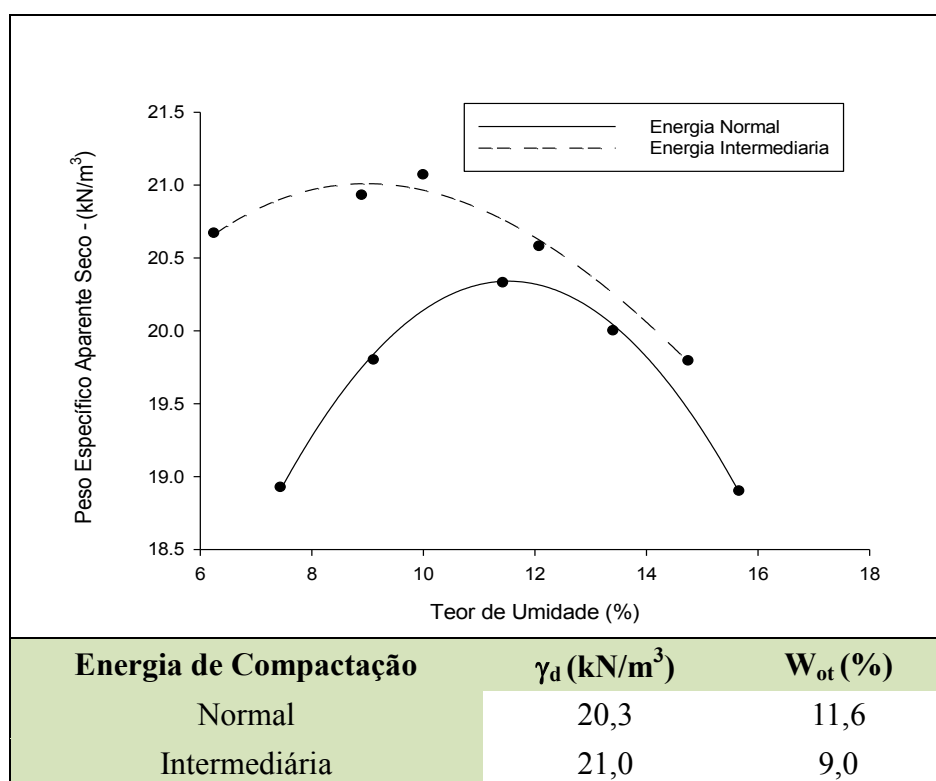


Figura 01 - Parâmetros ótimos de compactação para a mistura com teores ótimos de rejeitos de minério de ferro.

Tabela 05 – Parâmetros dos ensaios de CBR para a mistura 60f-40c, com e sem adição de cimento.

Ensaio CBR			
Teor de Cimento (%)	Energia	CBR (%)	Expansão CBR
0	Normal	20,4	Inferior a 0,05%
5	Normal	43,7	
0	Intermediária	50	
5	Intermediária	174	
* Período de cura de 7 dias em câmara úmida.			

Utilizou-se o teor de 5 % de cimento na mistura com teores ótimos de rejeitos de minério de ferro, no ensaio de CBR, por entender que se tratará do melhoramento das propriedades de engenharia desse material, e ainda porque dentre os teores de cimento empregados neste trabalho, 5% foi a porcentagem de cimento que apresentou maior resistência mecânica, conforme tabela 06 bem como pelo fato de ser um quantitativo viável do ponto de vista econômico, ainda dentro do conceito de melhoramento de solos.

Conforme apresentado na Tabela 05, pode-se verificar que a adição de 5 % de cimento representou um acréscimo 114 % no valor da capacidade de suporte desse material na energia Normal, e um acréscimo de 248 % para a energia Intermediária. Os valores de CBR obtidos foram de 43,7 % para a energia Normal e 174 % para a energia Intermediária.

Diante dos resultados apresentados na Tabela 05, salienta-se que, perante os valores de CBR encontrados para a mistura de rejeitos de minério de ferro analisada e melhorada com cimento, no uso da energia de compactação do Proctor Intermediário e considerando os critérios técnicos propostos pelo DNIT, em que um dos parâmetros em uso para dimensionamento de pavimentos flexíveis é do CBR, esta mistura poderia ser aplicada como camada de base em pavimento rodoviário, se atendesse aos demais critérios técnicos propostos para essa finalidade, visto que possui valor de CBR superior a 80 % e Expansão menor do 0,5%. Embora o controle de qualidade de misturas com adição de cimento e os seus critérios de aplicabilidade são relativos a valores de resistência à compressão não confinada.

Na Tabela 06, são apresentados os valores dos ensaios de resistência à compressão não confinada (RCNC), para as misturas com teores ótimos de rejeito de

minério de ferro, melhoradas com cimento nos teores de 3%, 4% e 5 % e submetidas à cura em câmara úmida por períodos de 3, 7 e 28 dias.

Tabela 06 – Resultados dos ensaios de resistência a compressão não confinada para misturas de rejeitos de minério de ferro, com e sem adição de cimento.

Energia Intermediária – RCNC (MPa)								
Cura (dias)	Média				Desvio padrão (n-1)			
	Teor de cimento							
	0%	3%	4%	5%	0%	3%	4%	5%
0	0.03	-	-	-	0.01	-	-	-
3	-	0.26	0.38	0.53	-	0.02	0.04	0.04
7	-	0.40	0.68	0.89	-	0.01	0.03	0.04
28	-	0.69	1.31	1.87	-	0.02	0.10	0.05
Energia Normal – RCNC (MPa)								
Cura (dias)	Média				Desvio padrão (n-1)			
	Teor de cimento							
	0%	3%	4%	5%	0%	3%	4%	5%
0	0.03	-	-	-	0.00	-	-	-
3	-	0.18	0.34	0.36	-	0.03	0.04	0.08
7	-	0.35	0.62	0.76	-	0.05	0.05	0.06
28	-	0.46	0.72	1.26	-	0.06	0.08	0.09

Sobre a resistência à compressão não confinada de corpos de prova compactados com a mistura com teores ótimos de rejeitos de minério de ferro (mistura 60f-40c), quando adicionados 5 % de cimento, em relação à massa seca desse material, e curada aos 7 dias em câmara úmida, observou-se que não foi possível alcançar a resistência mínima, 2,1 MPa, exigida para atender as especificações técnicas para a dosagem de cimento visando a estabilização de solos, conforme explicitado na norma técnica NBR 12253 (ABNT, 2012a), apesar de ter acrescido em mais de 28 vezes a resistência inicial, para a energia Intermediária, e 24 vezes para energia Normal.

Quanto aos resultados dos ensaios de resistência a compressão não confinada em relação às energias Normal e Intermediária, verificou-se que não ocorreu o incremento da resistência mecânica para a mistura sem adição de cimento, o que pode ser comprovado, uma vez que a tensão de ruptura para as energias não variou, apresentando o valor de 0,03 MPa.

Entretanto, verifica-se que para a energia de compactação do Proctor Intermediário, o incremento da resistência mecânica foi superior ao da energia de compactação do Proctor Normal, atingindo, para os períodos de cura de 3, 7 e 28 dias, acréscimos da ordem, respectivamente, de 47,2 %, 17,1 % e 48.41 % para o teor de 5 % de cimento em relação à massa seca da mistura.

Cabe ressaltar que os valores obtidos para as resistências à compressão representam a média de 3 corpos de prova e o desvio padrão foi abaixo de 10 % para os casos estudados.

A Figura 02 mostra a curva de ajuste entre a variação da resistência aos 7 dias de cura em função dos diferentes teores de cimento estudados. A curva de ajuste é uma equação quadrática, obtida por regressão ajustada aos dados obtidos experimentalmente.

A equação ajustada permite inferir que para um teor de cimento da ordem de 8,5 %, em relação a massa seca desse material, é possível atingir uma tensão de ruptura, com valor da ordem de 2,15 MPa e com um erro estimado de 0.04MPa.

A Tabela 07 apresenta os parâmetros de classificação geotécnica segundo a metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical). A mistura de rejeitos de minério de ferro, denominada 60f-40c, apresenta baixa resistência à erodibilidade, apresentando um alto percentual de perda de massa por imersão, o que pode ser explicado pela distribuição granulométrica uniforme e baixa coesão, que é da ordem de 19 kPa, segundo dados de PINTO (2013). A adição de cimento à esta mistura permitiu reduzir a perda de massa quando imerso em água, configurando uma melhora nas suas propriedades mecânicas e hidráulicas, com interferência positiva na sua classificação geotécnica.

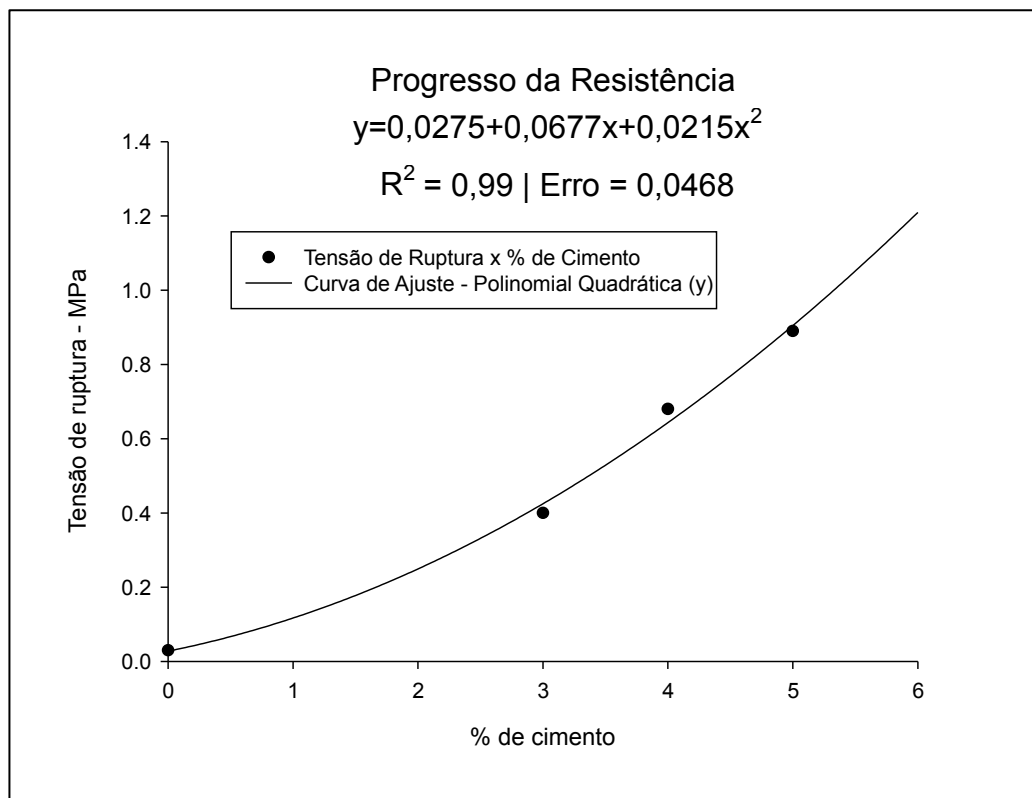


Figura 02 – Equação de previsão da resistência mecânica em função de diferentes teores de cimento, por meio da função quadrática de regressão.

De acordo com a tabela 07, a perda de massa por imersão reduziu de 379 % para a amostra da mistura 60f-40c no estado natural para 37 % na mistura 60f-40c + 5 % de CPII-E-32, em relação a sua massa seca, reduzindo significativamente a sua erodibilidade. As perdas de massa superiores a 100% encontradas para a mistura de rejeitos de minério de ferro sem adição de cimento justificam-se pelo fato de que os cálculos da perda de massa são relativos a massa de solo extrudada, ou seja, é referente a massa do corpo de prova que fica 1,0 cm saliente (fora do cilindro de compactação Mini-MCV).

Quanto à classificação geotécnica, de acordo com a metodologia MCT, a mistura 60f-40c no estado natural foi classificada como pertencente ao grupo NA, em que os solos desse grupo são geralmente as areias, siltes e misturas de areias e siltes, não possuindo finos argilosos coesivos, ou seja, trata-se de uma areia siltosa não laterítica. Segundo as proposições desta metodologia, apresentam índices classificatórios que a desqualificam para quase todo tipo de aplicação em camada de pavimentos, visto que os solos do grupo NA, mesmo quando devidamente compactados, podem ser relativamente permeáveis, pouco coesivos e pouco contráteis quando secos, características pouco

desejáveis para bases de pavimentos, apesar de possuírem de média a elevada capacidade de suporte.

Tabela 07 – Parâmetros da classificação de solos segundo a metodologia MCT para amostras da mistura 60f-40c, no estado natural e com adição de cimento.

Classificação MCT		
Parâmetros	Amostra	
	60f-40c+5%CPII-E-32	60f-40c
Coeficiente c'	0,28	0,33
Coeficiente d'	21	18
Coeficiente e'	1,10	1,70
Perda de Massa por Imersão (Pi)	37	379
Mini-MCV	10	10
Classificação M.C.T	LA	NA

A mistura 60f-40c + 5 % de CII-E-32 foi classificada como pertencente ao grupo LA, que inclui sobretudo areias com poucos finos de comportamento laterítico, e misturas como areia siltosa laterítica, o que a torna aplicável para diversas camadas do pavimento, incluindo a camada de base.

A laterização de solos tropicais dá origem a uma cimentação natural causada pelos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, No caso da mistura, a cimentação desenvolvida pela adição de cimento induziu um processo "artificial de laterização".

CONCLUSÕES

A mistura de rejeitos de minério analisada e composta por 60 % de rejeito de flotação e 40 % de rejeito concentração magnética, não apresenta comportamento mecânico compatível para uso em camadas de base de pavimentos flexíveis e aterros geotécnicos, mesmo apresentando valores de CBR acima dos limites mínimos recomendados, haja vista que não possui estabilidade conforme OLIVEIRA, 2013, pois trata-se de uma mistura classificada como A-4(1), com granulometria uniforme, e apresentou elevada perda de massa quando imerso em água. Além ainda de perda de massa total no ensaio de durabilidade superior a 10%, valor máximo aceitável para este tipo de material, segundo NBR 12253, (ABNT, 2012a).

A adição de 5 % de cimento agregou melhorias às suas propriedades mecânicas e hidráulicas, levando à sua capacidade de suporte média, medida pelo CBR, para cerca

de 140 %, e da resistência à compressão não confinada para cerca de 0,89 MPa. A classificação dessa mistura segundo a metodologia MCT foi LA (areia siltosa laterítica), e conforme as propostas desta classificação o resultado desta mistura pode ser aplicada com bons resultados nas diversas camadas do pavimento segundo (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

Estimou-se em cerca de 8,5 % de cimento, o percentual necessário para se conseguir uma resistência à compressão simples da ordem de 2,15 MPa, que qualificaria esta mistura para aplicação em camada de base. O resultado da estimativa por regressão quadrática, apresentado, deve ser tido como parâmetro inicial para dosagem desta mistura com finalidade de aplicação em camada de base de pavimento flexível, haja vista que obviamente tal mistura precisaria ser avaliada experimentalmente, para se determinar a real tensão de ruptura no ensaio de compressão simples e em face das características granulométricas dos rejeitos que poderão resultar em elevadas retrações volumétricas com a inevitável presença de fissuras e trincas.

No que se refere à aplicação da mistura 60f-40c + 5% CII-E-32 como enchimento de aterros, pode-se dizer que, quando aplicado em locais onde a ação de águas pluviais não ocorra de forma direta, apresentará ótimos resultados, pois conforme apresentado a mistura apresenta ótima capacidade de suporte, baixa expansibilidade e média tensão de ruptura a compressão. Atendendo por tanto o que prescreve a norma ES 108, (DNIT, 2009), que determinar os parâmetros mínimos em $CBR > 2\%$ e $expansão < 4\%$.

Por todo os fatos expostos, conclui-se que a utilização da mistura 60f-40c + 5% CII-E-32 possibilita perspectivas de "ganhos de cunho ambiental", ao se criar alternativas de utilização de rejeitos, normalmente dispostos de forma impactante ao meio ambiente. Assim, abrem-se perspectivas de tratamento e utilização destes materiais como coprodutos industriais ao invés de simplesmente rejeitos da produção da indústria de mineração.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – RDP-00084-10, pelo apoio financeiro ao primeiro autor na realização desta pesquisa, à empresa Vale S.A pelo fornecimento dos rejeitos de minério de ferro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12253**: 2012: Solo-cimento: Dosagem para emprego como camada de pavimento: Procedimento. Rio de Janeiro, ABNT, 2012a. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11798**: 2012: Base de solo-cimento: Materiais para base de solo-cimento. Requisitos. Rio de Janeiro, ABNT, 2012b. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12025**: 2012: Solo-cimento: Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012c. 02p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: 1991: Cimento Portland composto - Especificação. Rio de Janeiro. ABNT, 1991. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895**: 1987: Solo: Ensaio do Índice de Suporte Califórnia. Rio de Janeiro: ABNT, 1987. 14p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: 1986: Solo: Ensaio de Compactação de Solos. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: 1984: Solo: Massa Específica Real dos Grãos. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 08p.

CAMPANHA, A. **Caracterização de minério de ferro para uso em pavimentação**. 2011. 104 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Departament de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

CAVALCANTI, C. **Sustentabilidade da economia: paradigmas alternativos de realização econômica**, In: _____. (Org.) Desenvolvimento e natureza: estudos para uma sociedade sustentável. São Paulo: Cortez Editora, 1995. p.153-76.

CHAMMAS, R. **Barragens de Contenção de Rejeitos**. 1989. 29 f. Notas de Aula (Curso de Especialização em Engenharia de Barragens - CEEB), Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, 1989.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ES 108**: 2009: Terraplenagem: Aterros: Especificação de Serviço. DNIT, 2009. 13 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. 2006. Rio de Janeiro: DNIT, 2006. 274 p.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. **ES-T 06**: 2005 Terraplenagem: Aterros: Especificação de serviços rodoviários. DER/PR, 2005. 10 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ES 302**: 1997: Pavimentação: sub-base de solo melhorado com cimento: Especificação. Rio de Janeiro: DNER, 1997a. 9 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ES 281**: 1997: Terraplenagem: Empréstimos. Rio de Janeiro: DNER, 1997b. 4 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **CLA 259**: 1996: Solos: classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura: Classificação. Rio de Janeiro: DNIT, 1996. 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 082**: 1994: Solos: Determinação do limite de plasticidade: Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNER, 1994a. 3 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 122**: 1994: Solos: Determinação do limite de liquidez: Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNER, 1994b. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 256**: 1994: Solos compactados com equipamento miniatura: Determinação da perda de massa por imersão. Rio de Janeiro: DNER, 1994c. 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 258**: 1994: Solos compactados em equipamento miniatura: Mini-MCV. Rio de Janeiro: DNER, 1994d. 14 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 051**: 1994: Solos: Análise granulométrica: Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNER, 1994. 4 p.

NOGAMI, J.S., VILLIBOR, D.F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Editora Villibor, 1995.

NOGAMI, J.S., VILLIBOR, D.F. Caracterização e Classificação Gerais de Solos para Pavimentação: Limitações do Método Tradicional, Apresentação de uma Nova Sistemática. In: 15ª Reunião Anual de Pavimentação, 1980, Belo Horizonte. **Anais... RAPv**, 1980. 38p.

OLIVEIRA, T. M. **Caracterização de misturas de rejeito de minério de ferro melhoradas com adição de cimento com vistas à aplicação em estradas e aterros**. 2013. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

PINTO, S. S. S. **Caracterização das propriedades físicas e mecânicas de misturas de diferentes tipos de rejeito para aplicação em pavimentos.** 2013. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

SOUSA, M. L. **Pavimentação rodoviária.** 2. ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1980. 361 p. 1 v.

CONCLUSÕES GERAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

CONCLUSOES GERAIS:

Conduziu-se um programa de ensaios de laboratório para se investigar a eficiência do emprego da mistura do rejeito de flotação com o rejeito de concentração magnética, melhorada com cimento, com vistas a aplicações em camadas de pavimento rodoviário, sob o ponto de vista das respostas mecânicas e hidráulicas desta mistura em face de realização de estudos geotécnicos. As conclusões deste trabalho são as seguintes:

Para os ensaios de compactação:

- i) O comportamento das diferentes misturas entre os rejeitos, sob o ponto de vista do teor de umidade, apresentou-se conforme relatos da literatura, onde as misturas granulometricamente mais finas tenderam a apresentar um maior valor do teor de umidade ótimo;
- ii) Quanto aos valores de peso específico aparente seco máximo, observou-se um comportamento inverso ao frequentemente relatado na literatura, mas antes dos comentários a seguir descritos deve-se lembrar de que os materiais estudados são granulares uniformes com textura de areia fina à média. As misturas granulometricamente mais finas tenderam a apresentar um maior valor. Entretanto, a investigação deste comportamento pode ser explicada pelo fato de que a diferença do peso específico real dos grãos entre os dois rejeitos é pouco significativa e assim misturas com granulometria mais fina, permitem a inserção de maior quantidade de grãos na mistura, o que leva a um aumento do peso e conseqüentemente eleva o peso específico aparente seco máximo;
- iii) Quanto ao emprego de diferentes energias, o comportamento da mistura é similar ao frequente relatado na literatura, com aumento do peso específico aparente seco máximo e diminuição do teor ótimo de umidade.

Integridade de corpos de prova em imersão:

- i) Corpos de prova moldados nas energias Proctor Normal e Intermediária, para a mistura 60f-40c com e sem adição de cimento, foram imersos em água, onde pode-se verificar que, sem adição de cimento, a mistura não

apresenta estabilidade em água, com o corpo de prova perdendo completamente a sua forma inicial. Com cimento, a perda de partículas ocorrida para a mistura foi mínima, tanto na energia Normal quanto na Intermediária.

Durabilidade por molhagem e secagem:

- i) A mistura 60f-40c, independente da energia de compactação, não apresenta potencial de uso na construção rodoviária, com relação ao ensaio de durabilidade por molhagem e secagem, pois apresenta perda máxima maior que a tolerada pelas normas vigentes;
- ii) A mistura 60f-40c melhorada com 5 % de cimento, para energia Normal e intermediária de compactação, resistiu aos doze ciclos do ensaio de durabilidade;
- iii) As energias de compactação empregadas influenciam significativamente nos resultados do ensaio de durabilidade por molhagem e secagem;
- iv) Somente com adição de cimento pode-se se empregar a mistura 60f-40c em camadas do pavimento rodoviário, ou com enchimento de aterros.

Permeabilidade:

- i) Os resultados de coeficiente de permeabilidade a 20°C das amostras, tanto na energia Normal quanto na energia Intermediária apresentam um leve declínio da permeabilidade, com a inserção de cimento;
- ii) A ordem de grandeza encontrada para os coeficientes de permeabilidade está condizente com a sua classificação granulométrica: tratam-se de materiais do tipo areia muito fina e siltes, mistura de ambos e argila;
- iii) Observa-se, também, que os menores coeficientes de permeabilidade obtidos foram para as misturas na energia Intermediária.

Classificação MCT:

- i) Verifica-se que a mistura 60f-40c possui um auto valor de perda de massa por imersão, mais um vez confirmando que este material não pode ser empregado sem, no mínimo, ter suas propriedades melhoradas quanto

a estabilidade superficial em água, como por exemplo aquela melhora conseguida com adição de cimento;

- ii) Quando melhorado com 5 % de cimento, a mistura 60f-40c é classificada como areia laterítica, e, segundo as propostas desta metodologia de classificação, pode ser empregada em diferentes camadas do pavimento. Diferentemente, sem adição de cimento, a mistura 60f-40c não pode ser empregada e é classificada como areia não laterítica.

Índice de Suporte Califórnia (ISC):

- i) A mistura 60f-40c apresenta capacidade de suporte, tanto na energia Normal quanto na energia Intermediária, valores de CBR superiores a 20%, valor mínimo para emprego em camada de sub-base conforme DNIT (2006).
- ii) Ao se adicionar de 5% de cimento a esta mistura, o valores de CBR superam 80 %, para a energia de compactação Intermediária,
- iii) Para dimensionamento empírico de pavimento flexível, a mistura sem adição de cimento apresenta capacidade de suporte para aplicação em camada de sub-base, de acordo com o que prescreve o DNIT (2006).

Resistência à compressão simples:

- i) Para o período de cura de 7 dias, a mistura 60f-40c melhorada com 5 % de cimento, compactado nas energias Normal e Intermediária, apresentaram, respectivamente, tensões de ruptura na ordem de 0,76 MPa e 0,89 MPa.
- ii) Apesar de não apresentar a tensão mínima de 1,2 MPa, resistência mínima recomenda para misturas estabilizadas com cimento a se empregar em camada de sub-base de pavimentos rodoviários, recomenda-se a aplicação desta mistura melhorada com 5 % de cimento, para aplicações em camada de sub-base de pavimentos rodoviários de baixo volume de tráfego por todos os dados verificados e estudados neste trabalho;

A mistura proveniente da combinação de 60 % do rejeito obtido do beneficiamento por flotação e 40 % do rejeito de concentração magnética obtido do beneficiamento por separação magnética, sem adição de cimento, não deve ser empregado como material geotécnico, pois não apresenta as propriedades mínimas exigíveis para a

sua aplicação, contudo, quando melhorados com 5 % de cimento Portland, obtém-se um novo material aplicável como sub-base de pavimento rodoviário e material de enchimento de aterros. A possibilidade de utilizar a mistura estudada como material geotécnico tem também um ganho de cunho ambiental, por possibilitar uma nova destinação e uso para um rejeito atualmente disposto em barragens de rejeito que, sobretudo, impactam negativamente o ambiente.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS:

Como este trabalho não avaliou as propriedades elastoplásticas do material (mistura 60f-40c) necessárias para o emprego das técnicas mecanicistas de pavimentação, sugere-se a realização dos estudos de deformação permanente e módulo de resiliência, bem como a determinação do coeficiente de Poisson necessários por exemplo para o dimensionamento mecânico de pavimentos.