LUIZ FERNANDO D'AGOSTINO

PRAIAS DE BARRAGENS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO:
CARACTERÍSTICAS E ANÁLISE DA SEDIMENTAÇÃO

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Doutor em Engenharia

Área de Concentração
Engenharia Mineral

Orientador:
Prof. Dr. Lindolfo Soares

São Paulo
2008

LUIZ FERNANDO D'AGOSTINO

PRAIAS DE BARRAGENS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO:
CARACTERÍSTICAS E ANÁLISE DA SEDIMENTAÇÃO

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Doutor em Engenharia

São Paulo
2008

LUIZ FERNANDO D'AGOSTINO

PRAIAS DE BARRAGENS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO:
CARACTERÍSTICAS E ANÁLISE DA SEDIMENTAÇÃO

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Doutor em Engenharia

Área de Concentração
Engenharia Mineral

Orientador:
Prof. Dr. Lindolfo Soares

São Paulo
2008

FICHA CATALOGRÁFICA

D'Agostino, Luiz Fernando

Praias de barragens de rejeitos de mineração: características e análise da sedimentação / L.F. D'Agostino. -- São Paulo, 2008.

374 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1. Barragem de rejeitos – Minas Gerais 2. Deposição de sedimentos 3. Transporte de sedimentos 4. Geotecnia 5. Simulação I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II. t.

Ao amor da minha família

AGRADECIMENTOS

Ao Prof.Dr. Lindolfo Soares pela idealização e orientação durante todos os anos desse estudo e por estar sempre disposto a discutir e a ajudar.

Às empresas mineradoras Bunge Fertilizantes S/A e CVRD S/A pela plena disponibilidade e atenção voltada às necessidades desta pesquisa, sem as quais não haveria este estudo.

Ao Prof. Dr. Henrique Kahn que proporcionou total disponibilidade de equipamentos, insumos e pessoal do Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP para a viabilidade desta pesquisa.

Ao Centro Tecnológico de Hidráulica da USP (CTH-USP), que permitiu o acesso irrestrito às suas dependências e uso de seus equipamentos, viabilizando as adaptações necessárias para os objetivos desta pesquisa.

À MICRONAL S/A por sua agilidade e presteza aos anseios da pesquisa, colocando à disposição equipamento e laboratório (MICRONAL-IPT) para realização das análises de imagens.

Ao Laboratório de Tratamento de Minérios (LTM) do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP pela disponibilidade de equipamentos que permitiram a realização de ensaios.

À Escola Mario Amato (SENAI/SP) que permitiu o uso de suas dependências para a realização de ensaios e proporcionou o conhecimento dos ótimos estagiários, Gisele, Alberto, Álvaro e João Paulo que trabalharam e colaboram significativamente para a realização dos estudos.

Ao Geól. Msc. Oriovaldo Cunha Martinez que viabilizou o início dessa jornada, reconhecendo a importância da pesquisa associada às atividades profissionais.

Ao então estudante e atual geólogo Ernesto Sumi que colaborou ativamente com a coleta das amostras e com a execução de ensaios.

Ao técnico Edvaldo Braga, o amigo Vavá, pelo empenho na realização dos ensaios de granulometria a úmido.

Às discussões sempre enriquecedoras com a Geól. Dra. Maria Manuela Maia Lé Tassinari.

À Eng. Msc. Carina Ulsen pelas conversas e discussões sobre metodologias e resultados.

Aos meus queridos Fernando e Magda por manterem sempre o ânimo, por ajudarem na revisão do trabalho, pelo interesse e pelo amor.

Não menos importante, a todos que tenham colaborado e que neste momento me falha a lembrança.

E, evidentemente, ao apoio e amor da minha Elizabeth.

"O valor das coisas não está no tempo em que elas duram, mas na intensidade com que acontecem. Por isso existem momentos inesquecíveis, coisas inexplicáveis e pessoas incomparáveis".

Fernando Pessoa

RESUMO

A mineração é formada pelo conjunto de ações de lavra, concentração e transformação do minério para múltiplas finalidades. O resultado da exploração de diversos minérios, após seus beneficiamentos, é a produção de rejeitos, em quantidades variáveis.

Características diversas como vazão e conteúdo de água na polpa, densidade, arredondamento, esfericidade e granulometria do material interferem e definem projetos e construção de barragens para contenção de rejeitos. Desta forma, o estudo e avaliação técnica dos rejeitos empregados na construção destas barragens e o seu comportamento são fundamentais para a divulgação e enriquecimento científico e prático, principalmente no que tange aos aspectos de segurança.

Foram avaliadas as características do material depositado ao longo de praias de rejeitos de minério de ferro e fosfato, analisando-se a granulometria, densidade real dos grãos, análise de forma (arredondamento, esfericidade e relação de aspecto), e os ensaios de simulação hidráulica, estudando a variabilidade da granulometria e forma dos grãos.

Verificou-se que a deposição hidráulica nas praias de rejeitos ocorre pelo efeito da granulometria e densidade, em lentes e/ou camadas com características semelhantes, condicionando variações verticais e horizontais, análoga a leques aluviais úmidos. Não foram observadas variações significativas na forma dos grãos ao longo da praia. Os ensaios de simulação revelam sedimentação em camadas planares a lenticulares, com a diminuição da granulometria à medida que se afasta do ponto de lançamento, mas alterada pelo efeito das paredes do tanque.

Portanto, os comportamentos geológico-geotécnicos das praias em barragens de contenção de rejeitos, determinados por uma variabilidade deposicional, devem ser considerados na elaboração de planos de instrumentação mais eficientes em futuros projetos.

ABSTRACT

The mining is formed by ore extraction, concentration, and transformation for multiple purposes. The result of the exploitation of several ores is, after their treatment, the tailings production in variable quantities..

Several characteristics as flow and content of water in the slurry, as well as density, roundness, sphericity, and grain size distribution of the sediments interfere and define projects and construction of tailings dams. Considering this, the study and technical evaluation of the tailings used are fundamental for scientific and practical enhancement, mainly referring to security aspects.

The material deposited along tailings beaches from iron and phosphate ores was investigated in grain size distribution, real density of the grains, grain shape analysis (roundness, sphericity, and aspect ratio). Also the hydraulic deposition (flumes) was analyzed according to the grain size distribution and shape analysis of sediments.

In tailings beaches it was found that the sedimentation happens, due to grain size distribution and density in lenses and/or layers with similar characteristics but with vertical and horizontal variations, much like humid alluvial fans. Significant variations were not observed in the grain shape analysis along the beaches. The flume tests revealed sedimentation in planar and lenses lamination, with decrease of the grain size distribution in a downstream direction, but modified by the effects of the flume walls.

Therefore, the geological and geotechnical behaviors of the beaches in tailings dams, characterized by depositional variability, should be considered in future projects with more efficient instrumentation plan.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Quadro da economia mineral do Brasil em 2006. (fonte: DNPM, 2007)	21
Figura 2 - Estimativa do percentual de rejeito de mineração. (fonte: modificado de dados do DNPM, 2001)	24
Figura 3 - Seqüência de um beneficiamento mineral típico com geração de rejeitos na forma de polpa (sólidos + água).	25
Figura 4 - Seqüência de alteamento de barragens de rejeito pelo método de montante (a), linha de centro (b) e jusante (c). (fonte: modificado de tailings.info, 2007).	32
Figura 5 - Grupos de materiais de empréstimo e suas aplicações de acordo com a norma SNIP-II-53-73. (fonte: modificado de Moretti & Cruz, 1996).	35
Figura 6 – Relação entre γ_s e D_{90}/D_{10}. (fonte: Moretti, 1988).	36
Figura 7 – Escala de arredondamento de Rabakov (fonte: Moretti, 1988).	36
Figura 8 – Determinação do γ_s a partir da correção da forma dos grãos. (fonte: modificado de Moretti, 1988).	37
Figura 9 - Métodos de descarga usualmente empregados em barragens de rejeitos, único ponto (a) e vários pontos (b). (fonte: modificado de Ribeiro, 2000)	38
Figura 10 - Perfil geométrico esquematizado da praia de rejeitos utilizando-se a técnica de aterro hidráulico. (fonte: modificado de Morris, 2004)	38
Figura 11. Bloco diagrama ilustrativo de leque aluvial. (fonte: modificado de Allen, 1984)	43
Figura 12 - Classificação do fluxo pela concentração de sólidos. (fonte: modificado de Graf, 1984).	43
Figura 13 – Representação do transporte de sedimentos (modificado de Best & Foulke, 2007).	44
Figura 14 - Variação da velocidade crítica (início de transporte) em função do tamanho das partículas. (fonte: modificado de Hjulström, 1965)	46
Figura 15 – Limites entre início de transporte e sedimentação em função do tamanho das partículas e tensão de cisalhamento. (fonte: modificado de Allen, 1984)	46
Figura 16 - Gráfico esquemático da velocidade de sedimentação em relação ao diâmetro do sedimento. (fonte: modificado de Selley, 1988)	48
Figura 17 - Gráfico de velocidade de deslocamento (isocinéticas) para deslocamento de partículas com diferentes diâmetros e densidades (fonte: modificado de Heywood, 1953)	48
Figura 18 - Diferentes formas de leito em fundos incoesivos e suas relações com a granulometria para diferentes regimes de fluxo. (fonte: Suguio, 1980)	50
Figura 19 - Arranjo físico do equipamento utilizado por Ferreira et al. (1980).	55
Figura 20 – Esquema do equipamento desenvolvido em Delft, Holanda. (fonte: modificado de De Groot et al., 1988)	57
Figura 21 – Esquema simplificado do equipamento de simulação desenvolvido na Universidade de Queensland. (fonte: modificado de Morris & Williams, 1996)	58
Figura 22 – Esquema do equipamento de simulação desenvolvido na Universidade de Brasília (fonte: Ribeiro, 2000)	62

Figura 23 - Mapa de acesso ao município de Araxá, MG, Bunge Fertilizantes S/A. (fonte: modificado de DER/MG, 2005)	69
Figura 24 - Mapa Geológico da região de Araxá, MG. (fonte: modificado de Seer, 1999).	70
Figura 25 - Fluxograma do processo de beneficiamento de rocha fosfática, Araxá, MG. (fonte: CETEM, 2001)	72
Figura 26 – Foto aérea da barragem de rejeitos B5, Bunge Fertilizantes S/A. Araxá, MG. (fonte: modificado de Google Earth, 2006)	74
Figura 27 - Mapa de acesso ao município de Mariana, MG, Complexo Mariana – CVRD. (fonte: modificado de DER/MG, 2005)	76
Figura 28 - Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero com suas principais minas e estruturas tectônicas (fonte: modificado de Baars & Rosière, 1994 apud Oliveira Jr., 2006).	77
Figura 29 – Foto aérea da barragem de rejeitos de Doutor, CVRD S/A, Mariana. (fonte: modificado de Google Earth, 2006)	79
Figura 30 – Fluxograma do processo de beneficiamento da Mina de Alegria, CVRD. (fonte: CVRD, 2006)	82
Figura 31 – Foto aérea da barragem de rejeitos de Campo Grande, CVRD S/A, Mariana. (fonte: modificado de Google Earth, 2006)	83
Figura 32 – Esquema da distribuição dos pontos de amostragem nas praias de rejeitos.	84
Figura 33 – Vista geral a partir do ponto de lançamento da praia de rejeitos da barragem B5, Bunge, situada em Araxá, MG.	86
Figura 34 – Vista geral da barragem B5, Bunge, mostrando à esquerda da foto, montante, a praia de rejeitos e a lagoa de decantação.	86
Figura 35 – Vista geral a partir do ponto de lançamento da praia de rejeitos da barragem de Doutor, CVRD S/A, situada em Mariana, MG.	87
Figura 36 – Vista geral do lançamento por “spigots” fixos na praia de rejeitos da barragem de Doutor, CVRD S/A, situada em Mariana, MG.	87
Figura 37 – Vista geral do eixo da barragem de Doutor, CVRD S/A, mostrando à montante, lado esquerdo da foto, praia de rejeitos.	88
Figura 38 – Vista geral do lançamento por “spigots” fixos na praia de rejeitos da barragem de Campo Grande, CVRD S/A, situada em Mariana, MG	88
Figura 39 – Vista geral a partir do ponto de lançamento da praia de rejeitos da barragem de Campo Grande, CVRD S/A, situada em Mariana, MG.	89
Figura 40 – Fluxograma do processo de análise dos sedimentos obtidos nas praias de rejeitos de mineração.	90
Figura 41. Seqüência esquemática de homogeneização por pilhas alongadas. (fonte: Kahn, 2003)	91
Figura 42 – Vista da pilha alongada de seção transversal triangular.	92
Figura 43 – Vista da pilha alongada de seção transversal triangular com extremidade irregular e não homogênea.	92
Figura 44 – Visão geral do recipiente hermeticamente fechado com amostra e suporte.	94
Figura 45 – Suporte metálico (“stub”) com grãos da amostra sobre a superfície adesiva de carbono (preta).	94

Figura 46 – Diferentes graduações do sedimento observadas por meio da análise granulométrica, a) bem graduada; b) desuniformes, c) uniformes. (fonte: modificado de Almeida, 2005)	95
Figura 47 – Diferentes diâmetros de esferas equivalentes gerados a partir de um grão irregular (fonte: modificado de Rawle, 2002 apud Papini, 2003)	96
Figura 48 - Esquema mostrando as relações entre os diferentes estados de um solo argiloso e os limites de consistência. (fonte: modificado de Fiori & Carmignami, 2001)	101
Figura 49 – Determinação da forma dos grãos por esfericidade e arredondamento. (fonte: modificado de Krumbein & Sloss, 1963 apud Cho et al., 2006)	104
Figura 50 – Determinação da esfericidade por medida dos eixos. (fonte: modificado de Lees, 1964, Janoo, 1998 apud Uthus et al., 2005)	104
Figura 51 – Determinação do arredondamento dos grãos (fonte: modificado de Powers, 1953)	105
Figura 52 – Esquema de aquisição de imagens de modo estático. (fonte: modificado de Sympatec, 2007)	107
Figura 53 – Esquema da estrutura necessária para obtenção de imagens de modo dinâmico. (fonte: modificado de Beckman Coulter, 2006)	108
Figura 54 – Vista do equipamento RapidVUE da Beckman Coulter utilizado no estudo (a) e exposição em detalhe do módulo (b) para captação de imagens, transparente por onde os grãos circulam em água.	108
Figura 55 - Detalhe da passagem dos grãos no módulo para captação de imagens de modo dinâmico com a contínua circulação de água. (fonte: modificado de Beckman Coulter, 2006)	109
Figura 56 - Representação esquemática dos parâmetros analisados em cada grão após captação de imagens do RapidVUE (fonte: modificado de Beckman Coulter, 2006)	109
Figura 57 – Equipamento de Simulação de Deposição Hidráulica (ESDH) utilizado no presente estudo. (fonte: modificado de Sumi, 2005)	112
Figura 58 – Canal de deposição do Departamento de Engenharia Hidráulica (POLI-USP) utilizado no presente estudo. (fonte: Arnez, 2004)	112
Figura 59 – Vista do canal utilizado para simulação de deposição hidráulica.	113
Figura 60 – Vista em diferentes perspectivas (a e b) do “dique de partida” utilizado no ESDH. Observar vedação completa no contato dique / parede de vidro.	113
Figura 61 – Vista das paredes de vidro do canal com suporte lateral externo de perfis metálicos (a) e internamente com continuidade no contato vidro / vidro (b).	114
Figura 62 – Vista geral do sistema de alimentação/preparação composto por reservatório, motor para agitação e válvula para controle de fluxo (a), confeccionado em acrílico incolor e transparente para avaliar eficiência da mistura sólido/água (b).	115
Figura 63 – Controlador de fluxo utilizado com saída em tubo flexível incolor e transparente.	116
Figura 64 – Vista em perfil do sistema de descarga da polpa do rejeito em um único ponto (a) e parte final do “T” com quatro pontos (b).	116
Figura 65 – Sistema de descarga adotado em um dos pontos de lançamento na Barragem de Campo Grande, em Mariana, MG.	117

Figura 66 – Praia de rejeitos no ESDH com marcas deixadas após sistemática utilizada de amostragem.	119
Figura 67 – Difratoograma de Raios-X da amostra coletada na Barragem B5, Bunge Fertilizantes S/A.	121
Figura 68 – Fotomicrografia dos grãos presentes na amostra coletada na Barragem B5, Bunge Fertilizantes S/A, com identificação numérica dos espectros de EDS.	121
Figura 69 – Espectros obtidos por EDS em microscópio eletrônico de varredura; 1 - quartzo, 2 – cobertura de goethita em quartzo, 3 – hidroxiapatita coberta parcialmente por goethita, 4 – agregado de minerais secundários, 5 – provável romanechita/holandita, 6 – monazita.	122
Figura 70 – Fotomicrografia com identificação numérica dos espectros de EDS dos grãos presentes na amostra coletada na Barragem B5, Bunge Fertilizantes S/A.	122
Figura 71 – Espectros obtidos por EDS em microscópio eletrônico de varredura; 7 – hematita/magnetita, 8 – mineral do grupo das cloritas, 9 – goiazita.	123
Figura 72 – Detalhe da fotomicrografia apresentada na Figura 70 com identificação numérica dos espectros de EDS dos grãos presentes na amostra coletada na Barragem B5, Bunge Fertilizantes S/A.	123
Figura 73 – Espectros obtidos por EDS em microscópio eletrônico de varredura; 10 – zircão, 11 – anatásio/rutilo.	124
Figura 74 – Difratoograma de Raios-X da amostra coletada na Barragem Doutor, CVRD S/A.	124
Figura 75 – Fotomicrografia com identificação numérica dos espectros de EDS dos grãos presentes na amostra coletada na Barragem Doutor, CVRD S/A.	125
Figura 76 – Detalhe da fotomicrografia apresentada na Figura 75 com identificação numérica dos espectros de EDS dos grãos da amostra coletada na Barragem Doutor, CVRD S/A.	125
Figura 77 – Espectros obtidos por EDS em microscópio eletrônico de varredura; 1 – quartzo. 2 – hematita, 3 e 4 – Goethitas com diferentes teores de Mn, Al, Si, P, 5 – Hematita.	126
Figura 78 – Detalhe do grão com identificação numérica dos espectros de EDS realizados em amostra coletada na Barragem Doutor, CVRD S/A.	126
Figura 79 – Espectros obtidos por EDS em microscópio eletrônico de varredura; cobertura de argilomineral (6) em grão de hematita (7).	127
Figura 80 – Difratoograma de Raios-X da amostra coletada na Barragem Campo Grande, CVRD S/A.	127
Figura 81 – Fotomicrografia com identificação numérica dos espectros de EDS realizados nos grãos da amostra coletada na Barragem Campo Grande, CVRD S/A.	128
Figura 82 – Fotomicrografia dos grãos da Barragem Campo Grande, CVRD com identificação numérica dos espectros de EDS realizados nos grãos da amostra coletada na Barragem Campo Grande, CVRD S/A	128
Figura 83 – Espectros obtidos por EDS em microscópio eletrônico de varredura; 1 – quartzo, 2 – hematita, 3 – argilomineral, 4 – hematita com alguma cobertura de argilomineral..	129

Figura 84 – Fotomicrografia dos grãos presentes na Barragem Campo Grande, CVRD S/A, com identificação numérica dos espectros de EDS realizados.	129
Figura 85 – Espectros obtidos por EDS em microscópio eletrônico de varredura; 5 – Magnetita, 6 – Hematita, 7 e 8 – hematitas com alguma cobertura de argilominerais.	130
Figura 86– Análise granulométrica por granulômetro a laser da Barragem B5.	131
Figura 87 – Representação dos dados estatísticos resultantes da análise granulométrica por granulômetro a laser da Barragem B5.	133
Figura 88 – Representação em planta dos valores de D_{50} resultantes da análise granulométrica por granulômetro a laser da Barragem B5.	133
Figura 89 – Análise granulométrica por peneiramento a úmido da Barragem B5.	134
Figura 90 – Representação dos dados estatísticos resultantes da análise granulométrica por peneiramento a úmido da Barragem B5.	136
Figura 91 – Representação em planta dos valores de D_{50} resultantes da análise granulométrica por peneiramento a úmido da Barragem B5.	136
Figura 92 – Análise granulométrica por análise de imagem da Barragem B5.	137
Figura 93 – Representação dos dados estatísticos resultantes da análise granulométrica por análise de imagem da Barragem B5.	139
Figura 94 – Representação em planta dos valores de D_{50} resultantes da análise granulométrica por análise de imagem da Barragem B5.	139
Figura 95 – Análise granulométrica por granulômetro a laser da Barragem Doutor.	140
Figura 96 – Representação dos dados estatísticos resultantes da análise granulométrica por granulômetro a laser da Barragem Doutor	142
Figura 97 – Representação em planta dos valores de D_{50} resultantes da análise granulométrica por granulômetro a laser da Barragem Doutor.	142
Figura 98 – Análise granulométrica por peneiramento a úmido da Barragem Doutor.	143
Figura 99 – Representação dos dados estatísticos resultantes da análise granulométrica por peneiramento a úmido da Barragem Doutor.	145
Figura 100 – Representação em planta dos valores de D_{50} resultantes da análise granulométrica por peneiramento a úmido da Barragem Doutor.	145
Figura 101 – Análise granulométrica por análise de imagem da Barragem Doutor.	146
Figura 102 – Representação dos dados estatísticos resultantes da análise granulométrica por análise de imagem da Barragem Doutor.	147
Figura 103 – Representação em planta dos valores de D_{50} resultantes da análise granulométrica por análise de imagem da Barragem Doutor.	148
Figura 104 – Análise granulométrica por granulômetro a laser da Barragem Campo Grande.	149
Figura 105 – Representação dos dados estatísticos resultantes da análise granulométrica por granulômetro a laser da Barragem Campo Grande.	150
Figura 106 – Representação em planta dos valores de D_{50} resultantes da análise granulométrica por granulômetro a laser da Barragem Campo Grande.	151
Figura 107 – Análise granulométrica por peneiramento a úmido da Barragem Campo Grande.	152

Figura 108 – Representação dos dados estatísticos resultantes da análise granulométrica por peneiramento a úmido da Barragem Campo Grande.	153
Figura 109 – Representação em planta dos valores de D_{50} resultantes da análise granulométrica por peneiramento a úmido da Barragem Campo Grande.	154
Figura 110 – Análise granulométrica por análise de imagem da Barragem Campo Grande.	155
Figura 111 – Representação dos dados estatísticos resultantes da análise granulométrica por análise de imagem da Barragem Campo Grande.	156
Figura 112 – Representação em planta dos valores de D_{50} resultantes da análise granulométrica por peneiramento a úmido da Barragem Campo Grande.	157
Figura 113 – Representação dos dados estatísticos de densidade real dos grãos da Barragem B5.	159
Figura 114 – Representação em planta dos valores de densidade da Barragem B5.	160
Figura 115 – Representação dos dados estatísticos de densidade real dos grãos da Barragem Doutor.	161
Figura 116 – Representação em planta dos valores de densidade da Barragem Doutor.	162
Figura 117 – Representação dos dados estatísticos de densidade real dos grãos da Barragem Campo Grande.	163
Figura 118 – Representação em planta dos valores de densidade da Barragem Campo Grande.	164
Figura 119 – Ilustração dos hábitos comuns do mineral quartzo (SiO_2).	167
Figura 120 – Ilustração dos hábitos comuns do mineral hematita (Fe_2O_3).	167
Figura 121 – Ilustração dos hábitos comuns do mineral apatita utilizados para representar hidroxiapatita ($\text{Ca}_5[\text{OH}](\text{PO}_4)_3$).	167
Figura 122 – Ilustração de alguns hábitos do mineral ilmenita ($\text{Fe}^{2+}\text{TiO}_3$).	168
Figura 123 – Ilustração de hábitos comuns presentes no mineral magnetita ($\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$).	168
Figura 124 – Ilustração do hábito usualmente observado no grupo da clorita (fórmula geral - $\text{A}_5\text{T}_4\text{O}_{10}\text{-Z}_8$, onde A=Al, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Li, Mg, Mn, ou Ni, T=Al, Fe^{3+}, Si, ou combinados, e Z=O e/ou OH).	168
Figura 125 – Ilustração de hábitos comuns do mineral anatásio (TiO_2).	169
Figura 126 – Visão parcial de amostra da barragem B5 obtida em microscópio eletrônico de varredura mostrando variação de tamanhos e formas.	170
Figura 127 – Visão parcial de amostra da barragem B5 mostrando variação da tonalidade relacionada à composição mineralógica.	170
Figura 128 – Visão parcial de amostra da barragem B5 mostrando grãos sub-angulosos e textura superficial picotada.	171
Figura 129 – Visão parcial de amostra da barragem B5 mostrando grãos sub-angulosos a sub-arredondados, com textura superficial picotada a corroída/intemperizada.	171
Figura 130 – Visão parcial de amostra da barragem B5 mostrando grãos sub-angulosos a sub-arredondados, com textura superficial picotada e por vezes, corroída/intemperizada com goethita.	172

Figura 131 – Visão parcial de amostra da barragem Doutor mostrando variação granulométrica relacionada à composição mineralógica (quartzo - tons de cinza escuro; hematita – tons de cinza claro).	173
Figura 132 – Visão parcial de amostra da barragem Doutor mostrando predomínio de grãos sub-angulosos, com textura superficial picotada e por vezes, corroída/intemperizada com goethita.	174
Figura 133 – Detalhe da Figura 132 onde se observa grãos sub-angulosos e sub-arredondados, com textura superficial picotada e corroída/intemperizada com goethita.	174
Figura 134 – Detalhe da Figura 132 com grãos sub-anguloso e textura superficial picotada a estriada.	175
Figura 135 – Visão parcial de amostra da barragem Campo Grande mostrando similaridade de tamanho entre os grãos de quartzo, tons de cinza escuro; e hematita/magnetita, tons de cinza claro.	176
Figura 136 – Detalhe da Figura 135 onde se observa grãos sub-angulosos e sub-arredondados, com textura superficial picotada e corroída/intemperizada com goethita.	176
Figura 137 – Detalhe da Figura 136 onde se observa grãos sub-angulosos e sub-arredondados, com textura superficial picotada e corroída/intemperizada com goethita e esfericidade variável.	177
Figura 138 – Representação dos dados estatísticos de relação de aspecto da Barragem B5.	178
Figura 139 – Representação em planta dos valores de relação de aspecto da Barragem B5.	179
Figura 140 – Representação dos dados estatísticos de esfericidade da Barragem B5.	180
Figura 141 – Representação em planta dos valores de esfericidade da Barragem B5.	181
Figura 142 – Representação dos dados estatísticos de relação de aspecto da Barragem Doutor.	182
Figura 143 – Representação em planta dos valores de relação de aspecto da Barragem Doutor.	183
Figura 144 – Representação dos dados estatísticos de esfericidade da Barragem Doutor.	184
Figura 145 – Representação em planta dos valores de esfericidade da Barragem Doutor.	185
Figura 146 – Representação dos dados estatísticos de relação de aspecto da Barragem Campo Grande.	186
Figura 147 – Representação em planta dos valores de relação de aspecto da Barragem Campo Grande.	187
Figura 148 – Representação dos dados estatísticos de relação de aspecto da Barragem Campo Grande.	188
Figura 149 – Representação em planta dos valores de esfericidade da Barragem B5.	189
Figura 150 – Análise granulométrica por granulômetro a laser das amostras de simulação da Barragem B5.	190

Figura 151 – Representação dos dados estatísticos resultantes da análise granulométrica por granulômetro a laser das amostras de simulação da Barragem B5.	192
Figura 152 – Análise granulométrica por análise de imagem das amostras de simulação da Barragem B5.	192
Figura 153 – Representação dos dados estatísticos resultantes da análise granulométrica por análise de imagem das amostras de simulação da Barragem B5.	194
Figura 154 – Análise granulométrica por granulômetro a laser das amostras de simulação da Barragem Campo Grande.	195
Figura 155 – Representação dos dados estatísticos resultantes da análise granulométrica por granulômetro a laser das amostras de simulação da Barragem Campo Grande.	196
Figura 156 – Análise granulométrica por análise de imagem das amostras de simulação da Barragem Campo Grande.	197
Figura 157 – Representação dos dados estatísticos resultantes da análise granulométrica por análise de imagem das amostras de simulação da Barragem Campo Grande.	198
Figura 158 – Representação dos dados estatísticos de relação de aspecto obtidos nas amostras de simulação da Barragem B5.	199
Figura 159 – Representação dos dados estatísticos resultantes da esfericidade obtidos nas amostras de simulação da Barragem B5.	200
Figura 160 – Representação dos dados estatísticos de relação de aspecto obtidos nas amostras de simulação da Barragem Campo Grande.	201
Figura 161 – Representação dos dados estatísticos resultantes da esfericidade obtidos nas amostras de simulação da Barragem Campo Grande.	202
Figura 162 – Representação dos dados de granulometria (D_{50}) das amostras analisadas ao longo da praia de rejeitos.	204
Figura 163 – Fotografia da estrutura sedimentar plano paralela presente ao longo das praias de rejeitos.	206
Figura 164 – Representação dos dados de densidade real dos grãos nas amostras analisadas ao longo da praia de rejeitos.	207
Figura 165 – Representação dos dados de relação de aspecto nas amostras analisadas ao longo da praia de rejeitos.	208
Figura 166 – Representação dos dados de esfericidade nas amostras analisadas ao longo da praia de rejeitos.	209
Figura 167 – Velocidade de sedimentação estimada nas amostras considerando diâmetro (D_{50}) obtido em granulômetro a laser (D_v).	210
Figura 168 – Velocidade de sedimentação estimada nas amostras considerando diâmetro (D_{50}) obtido em peneiramento a úmido (D_s).	210
Figura 169 – Combinação dos dados de densidade real dos grãos, tamanho dos grãos (D_v) e linhas isocinéticas.	211
Figura 170 – Combinação dos dados de densidade real dos grãos, tamanho dos grãos (D_s) e linhas isocinéticas.	212
Figura 171 – Combinação dos dados de densidade real dos grãos, tamanho dos grãos (D_{av}) e linhas isocinéticas.	212

Figura 172 – Correlação dos dados de densidade real dos grãos com a relação de aspecto das amostras.	213
Figura 173 – Correlação dos dados de densidade real dos grãos com a esfericidade das amostras.	214
Figura 174 – Perfil longitudinal esquemático do padrão da distribuição dos grãos ao longo da praia de rejeitos da barragem B5.	214
Figura 175 – Perfil longitudinal esquemático do padrão da distribuição dos grãos ao longo da praia de rejeitos da barragem Doutor.	215
Figura 176 – Perfil longitudinal esquemático do padrão da distribuição dos grãos ao longo da praia de rejeitos da barragem Campo Grande.	216
Figura 177 – Perfil longitudinal esquemático da variação da permeabilidade horizontal (K_h) ao longo das praias de rejeitos. Os comprimentos dos vetores demonstram a variação de K_h em função da camada atravessada.	218
Figura 178 – Visão da superfície e canais meandantes formados ao longo da praia na simulação hidráulica de barragem de rejeitos.	220
Figura 179 – Perfil longitudinal ao longo das praias de rejeitos. Observar formação de lentes com diferentes texturas e coloração evidenciando diferenças mineralógicas na simulação com rejeitos da barragem B5 (a) e Campo Grande (b).	220
Figura 180 – Vista da praia de rejeitos em simulação hidráulica, com efeito das paredes (condição de contorno) na erosão e transporte dos grãos. As flechas indicam a redistribuição dos materiais erodidos na região lateral a montante.	221

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Posição nacional quanto às reservas e produções de bens minerais. ____	22
Tabela 2 - Elementos necessários à construção de uma residência e relação de dependência com bens minerais. _____	23
Tabela 3 – Métodos construtivos de barragens de contenção de rejeitos. _____	33
Tabela 4 – Valores de $\gamma_{\alpha\beta}$. _____	37
Tabela 5 – Parâmetros médios das areias usadas nos ensaios de simulação em laboratório _____	60
Tabela 6 – Características do rejeito de Mina de Morro Agudo. _____	63
Tabela 7 - Diferentes tipos de ensaio de simulação de deposição hidráulica (ESDH). _____	64
Tabela 8 – Composições mineralógicas médias (%) dos diferentes tipos de minério da mina de Araxá, MG, da Bunge Fertilizantes S/A _____	71
Tabela 9 – Composições mineralógicas médias (%) do minério lavrado na Mina de Alegria - Mariana, MG, da CVRD. _____	81
Tabela 10 – Identificação das amostras coletadas ao longo das praias. _____	85
Tabela 11– Diferentes valores de relação de aspecto e esfericidade para formas idealizadas. _____	106
Tabela 12– Dados estatísticos obtidos a partir da análise granulométrica por granulômetro a laser da Barragem B5. _____	132
Tabela 13– Dados estatísticos obtidos a partir da análise granulométrica por peneiramento a úmido da Barragem B5. _____	135
Tabela 14– Dados estatísticos obtidos a partir da análise granulométrica por análise de imagem da Barragem B5. _____	138
Tabela 15– Dados estatísticos obtidos a partir da análise granulométrica por granulômetro a laser da Barragem Doutor. _____	141
Tabela 16 – Dados estatísticos obtidos a partir da análise granulométrica por peneiramento a úmido da Barragem Doutor. _____	144
Tabela 17– Dados estatísticos obtidos a partir da análise granulométrica por análise de imagem da Barragem Doutor. _____	147
Tabela 18– Dados estatísticos obtidos a partir da análise granulométrica por granulômetro a laser da Barragem Campo Grande. _____	150
Tabela 19– Dados estatísticos obtidos a partir da análise granulométrica por peneiramento a úmido da Barragem Campo Grande. _____	153
Tabela 20 – Dados estatísticos obtidos a partir da análise granulométrica por análise de imagem da Barragem Campo Grande. _____	155
Tabela 21 – Dados de densidade de alguns minerais presentes nas amostras analisadas. _____	158
Tabela 22 – Dados estatísticos de densidade real dos grãos obtidos a partir da análise por picnômetro da Barragem B5. _____	159
Tabela 23 – Dados estatísticos de densidade real dos grãos obtidos a partir da análise por picnômetro da Barragem Doutor. _____	161
Tabela 24 – Dados estatísticos de densidade real dos grãos obtidos a partir da análise por picnômetro da Barragem Campo Grande. _____	163

Tabela 25 – Dados estatísticos de relação de aspecto obtidos a partir da análise de imagem das amostras da Barragem B5.	179
Tabela 26 – Dados estatísticos de esfericidade obtidos a partir da análise de imagem das amostras da Barragem B5.	180
Tabela 27 – Dados estatísticos de relação de aspecto obtidos a partir da análise de imagem das amostras da Barragem Doutor.	182
Tabela 28 – Dados estatísticos de esfericidade obtidos a partir da análise de imagem das amostras da Barragem Doutor.	184
Tabela 29 – Dados estatísticos de relação de aspecto obtidos a partir da análise de imagem das amostras da Barragem Campo Grande.	186
Tabela 30 – Dados estatísticos de esfericidade obtidos a partir da análise de imagem das amostras da Barragem Campo Grande.	188
Tabela 31– Dados estatísticos obtidos a partir da análise granulométrica por granulômetro a laser nas amostras da simulação da Barragem B5.	191
Tabela 32– Dados estatísticos obtidos a partir da análise granulométrica por análise de imagem nas amostras da simulação da Barragem B5.	193
Tabela 33 – Dados estatísticos obtidos a partir da análise granulométrica por granulômetro a laser nas amostras da simulação da Barragem Campo Grande.	195
Tabela 34 – Dados estatísticos obtidos a partir da análise granulométrica por análise de imagem nas amostras da simulação da Barragem Campo Grande.	197
Tabela 35 – Dados estatísticos da relação de aspecto obtidos nas amostras da simulação da Barragem B5.	199
Tabela 36 – Dados estatísticos da esfericidade obtidos nas amostras da simulação da Barragem B5.	200
Tabela 37 – Dados estatísticos da relação de aspecto obtidos nas amostras da simulação da Barragem Campo Grande.	201
Tabela 38– Dados estatísticos da esfericidade obtidos nas amostras da simulação da Barragem Campo Grande.	202
Tabela 39 – Valores estimados da permeabilidade em função da granulometria do solo.	206
Tabela 40– Dados de D_{50} das amostras coletadas em campo e de simulação das barragens B5 e Campo Grande.	222
Tabela 41– Dados médios de relação de aspecto e esfericidade das amostras coletadas em campo e de simulação das barragens B5 e Campo Grande.	222

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
2. OBJETIVOS	28
3. REVISÃO DA LITERATURA	30
3.1. Barragens de rejeito	30
3.2. Sedimentação	42
3.3. Simulação hidráulica	52
4. MATERIAIS E MÉTODOS	67
4.1. Materiais	67
4.1.1. Araxá – Bunge Fertilizantes S/A	68
4.1.2. Mariana – Barragem Doutor/ Circuito Timbopeba – CVRD	75
4.1.3. Mariana – Barragem Campo Grande/ Circuito Alegria – CVRD	81
4.2. Amostragem	83
4.3. Ensaios laboratoriais	90
4.3.1. Preparação das amostras	91
4.3.2. Caracterização Química e Mineralógica	93
4.3.3. Análise Granulométrica	94
4.3.4. Densidade real dos grãos	98
4.3.5. Limites de Liquidez e Plasticidade	100
4.3.6. Análise de forma	103
4.4. Simulação Hidráulica Aplicada a Rejeitos de Mineração	110
5. RESULTADOS	120
5.1. Caracterização Química e Mineralógica	120
5.1.1. Amostra Barragem B5 - Bunge	120
5.1.2. Amostra Barragem Doutor/ Circuito Timbopeba – CVRD	124
5.1.3. Amostra Barragem Campo Grande/ Circuito Alegria - CVRD	127
5.2. Análise granulométrica	131
5.2.1. Amostra Barragem B5 - Bunge	131

5.2.2.	Amostra Barragem Doutor/ Circuito Timbopeba – CVRD _____	140
5.2.3.	Amostra Barragem Campo Grande/ Circuito Alegria - CVRD _____	149
5.3.	Densidade real dos grãos _____	157
5.3.1.	Amostra Barragem B5 - Bunge _____	158
5.3.2.	Amostra Barragem Doutor/ Circuito Timbopeba – CVRD _____	160
5.3.3.	Amostra Barragem Campo Grande/ Circuito Alegria - CVRD _____	162
5.4.	Limites de Liquidez e Plasticidade _____	165
5.5.	Análise de Forma _____	166
5.5.1.	Análise Qualitativa _____	166
5.5.1.1.	<i>Amostra Barragem B5 - Bunge _____</i>	169
5.5.1.2.	<i>Amostra Barragem Doutor/ Circuito Timbopeba – CVRD _____</i>	172
5.5.1.3.	<i>Amostra Barragem Campo Grande/ Circuito Alegria - CVRD _____</i>	175
5.5.2.	Análise Quantitativa _____	177
5.5.2.1.	<i>Amostra Barragem B5 - Bunge _____</i>	178
5.5.2.2.	<i>Amostra Barragem Doutor/ Circuito Timbopeba – CVRD _____</i>	181
5.5.2.3.	<i>Amostra Barragem Campo Grande/ Circuito Alegria - CVRD _____</i>	185
5.6.	Simulação Hidráulica Aplicada a Rejeitos de Mineração _____	190
5.6.1.	Análise granulométrica _____	190
5.6.2.	Análise de forma _____	198
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS _____	203
7.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES _____	223
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____	227
	APÊNDICE A – Densidade real dos grãos _____	235
	APÊNDICE B – Análise quantitativa da forma dos grãos _____	242
	ANEXO A – Análise granulométrica _____	266

1. INTRODUÇÃO

A atividade mineral é formada pelo conjunto de operações de lavra, concentração e transformação do minério para múltiplas finalidades. Entre essas finalidades destacam-se o emprego energético, matéria-prima para indústria de transformação metalúrgica, construção civil, insumos agrícolas e tecnologia.

A importância econômica da indústria extrativa mineral é notável em todo o mundo, e, em especial, no Brasil, que historicamente apresenta o seu desenvolvimento econômico e populacional em íntima relação com o aproveitamento dos seus recursos minerais, onde em 2001, o produto da indústria de transformação mineral alcançou a participação de 8,4% (US\$42,6 bilhões) do PIB brasileiro e em 2006, 5,5% do PIB brasileiro (US\$58,7 bilhões) (Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, 2002, 2007) como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Quadro da economia mineral do Brasil em 2006. (fonte: DNPM, 2007)

O Brasil é detentor de grandes reservas de uma ampla gama de minerais metálicos e não metálicos (International Institute for Environment and Development -

IIED, 2002) com expressiva produção de diversos minerais, demonstrando a vocação mineral do país (Tabela 1).

Tabela 1 - Posição nacional quanto às reservas e produções de bens minerais.

Mineral	Participação na produção mundial (%)	Posição	Mineral	Participação nas reservas mundiais (%)	Posição
Nióbio	95,2	1°	Nióbio	96,9	1°
Ferro	18,5	2°	Tântalo	46,3	2°
Manganês	13,9		Grafita	26,8	
Tântalo	13,4				
Alumínio	12,8				
Crisotila	10,2	3°	Vermiculita	5,7	3°
Magnesita	8,4		Alumínio	8,3	
Grafita	7,4				
Rochas Ornamentais	7,6	4°	Estanho	6,7	4°
Vermiculita	5,4		Magnesita	8,9	
Caulim	5,2	5°	Ferro	7,2	5°
Estanho	3,3		Manganês	3,0	

fonte: DNPM, 2006

O crescimento populacional de países desenvolvidos e em desenvolvimento associado às necessidades de melhor qualidade de vida (Tabela 2), aliados à constante demanda das indústrias e processos de beneficiamento cada vez mais eficientes, fazem com que os níveis de minerais metálicos e não metálicos se mantenham ou mesmo cresçam.

Com isso, sistematicamente, maiores volumes de rejeito serão gerados, pois o resultado da exploração de diversos minérios é também, em quantidades variáveis, a produção de rejeitos. Os rejeitos de mineração podem ser descritos como “fração do minério destituída de mineral útil ou valor econômico, originada no processo de beneficiamento mineral” (Associação Paulista de Engenheiros de Minas - APEMI, 1987), ou, melhor, formada predominantemente por material sem valor econômico – ganga e, portanto, definidos por variáveis econômicas e tecnológicas mutáveis ao longo do tempo. O termo "rejeito" empregado neste texto não deve ser confundido com estéril, posto que o estéril usualmente não é submetido aos processos de beneficiamento.

Tabela 2 - Elementos necessários à construção de uma residência e relação de dependência com bens minerais.

Elemento construtivo	Principais substâncias minerais utilizadas
Tijolo	argila
Bloco	areia, brita, calcário
Fiação elétrica	cobre, petróleo
Lâmpada	quartzo, tungstênio, alumínio
Fundações de concreto	areia, brita, calcário, ferro
Ferragens	ferro, alumínio, cobre, zinco, níquel
Vidro	areia, calcário, feldspato
Louça sanitária	caulim, calcário, feldspato, talco
Azulejo	caulim, calcário, feldspato, talco
Piso cerâmico	argila, caulim, calcário, feldspato, talco
Isolante - lã de vidro	quartzo e feldspato
Isolante - agregado	mica
Pintura - tinta	calcário, talco, caulim, titânio, óxidos metálicos
Caixa de água	calcário, argila, gipsita, amianto, petróleo
Impermeabilizante - betume	folhelho pirobetuminoso, petróleo
Pias	mármore, granito, ferro, níquel, cobalto
Encanamento metálico	ferro ou cobre
Encanamento PVC	petróleo, calcita
Forro de gesso	gipsita
Esquadrias	alumínio ou ligas de ferro-manganês
Piso pedra	ardósia, granito, mármore
Calha	ligas de zinco-níquel-cobre ou fibro-amianto
Telha cerâmica	argila
Telha fibro-amianto	calcário, argila, gipsita, amianto
Pregos e parafusos	ferro, níquel

fonte: MINEROPAR, 2004

Na Figura 2 pode ser observado o quadro atual de produção de rejeito no Brasil, estimado a partir dos dados do Anuário Mineral Brasileiro (Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, 2001) referente às 22 principais substâncias da Produção Mineral Brasileira, através da expressão:

$$(\text{Produção Bruta} - \text{Produção Beneficiada}) / \text{Produção Bruta} \quad (1)$$

Apesar de ser um dado generalista, onde é contabilizado o volume de rejeitos sem levar em consideração as características locais das lavras e seus depósitos,

este serve como referência dos volumes totais produzidos para cada substância. Comparando os dados obtidos por Abrão (1987), utilizando a mesma sistemática, com estes estimados para 2001, observa-se o crescimento de 160 milhões de toneladas para cerca de 420 milhões de toneladas de rejeito produzido (>250%).

Figura 2 - Estimativa do percentual de rejeito de mineração. (fonte: modificado de dados do DNPM, 2001)

Os métodos empregados usualmente na disposição e armazenamento de tais materiais são, basicamente, empilhamentos e barragens de contenção de rejeitos. O método apropriado está condicionado ao tipo de depósito, ao bem mineral explorado, aos processos de beneficiamento e, conseqüentemente, às características do material produzido (Figura 3).

Considerando-se a diversidade de características de uma polpa (rejeito sólido + água) é fundamental conhecer as propriedades da rocha fonte, sua caracterização tecnológica e propriedades geotécnicas. Conforme constatado por pesquisadores brasileiros em análises isoladas de minérios (Espósito, 1995, 2000; Ribeiro, 2000; Hernandez, 2002), pequenas variações de litologia na rocha fonte e nos processos de beneficiamento podem resultar em mudanças de volumes produzidos, faixas granulométricas, variação de densidade, ângulos das arestas e arredondamento dos grãos que compõem o rejeito, influenciando sobremaneira o desenvolvimento de projetos de implantação e o tipo de alteamento das barragens.

Figura 3 - Seqüência de um beneficiamento mineral típico com geração de rejeitos na forma de polpa (sólidos + água).

O conteúdo de água, resultado direto do tipo de beneficiamento, pode promover no material depositado diferentes graus de saturação, fato extremamente perigoso aos corpos de barragem em terra, pois eleva a linha piezométrica e, conseqüentemente, a pressão neutra atuante no corpo de barramento causando sérios riscos de liquefação, “*piping*” e instabilidade geral da estrutura. As atividades de lavra e processamento mineral podem ainda contribuir para a poluição das águas superficiais e subterrâneas, caso não haja um controle rigoroso das operações envolvidas e um conhecimento dos processos de lixiviação e intemperismo aos quais os minerais estarão expostos. Tal diversidade deve ser observada detalhadamente, pois é fundamental para definição dos projetos, áreas de disposição e, assim, dos investimentos para a construção das barragens.

As barragens e lagoas para contenção e armazenamento de rejeitos estão freqüentemente presentes como parte integrante da planta da mineração, dentro das obras de servidão (Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, 1984; International Council on Metals and the Environment & United Nations Environment Programme Industry and Environment, 1998a). Entretanto, existem diversos modos de estudar e projetar suas implantações; da ausência total de estudos, considerando apenas conceitos empíricos, ao completo levantamento e análise de parâmetros geológicos, geotécnicos e ambientais do local onde a obra será implantada. Quanto mais completa a avaliação desses parâmetros, maior o custo de projeto, muitas

vezes visto como investimento sem retorno ao empreendimento mineral. A equalização entre segurança, economia e minimização de impactos ambientais é o desafio imposto constantemente aos projetistas, algumas vezes sem sucesso.

Os conceitos básicos para implantação das barragens de rejeito derivam da experiência acumulada por inúmeros profissionais ligados à construção de barragens de terra e concreto com fins de geração de energia elétrica no Brasil e no mundo (Vick, 1990) e, sobretudo, com base nas técnicas de aterros hidráulicos. Contudo, é notória a diferença de investimentos entre as duas linhas de obras, claramente determinada pelo interesse econômico sobre o projeto, uma vez que o objeto de interesse do minerador não é o rejeito produzido e dessa forma os investimentos privilegiam, francamente, a extração e beneficiamento do minério. Geralmente, conforme descrito por Ribeiro (2000), o material é lançado de forma quase aleatória não sendo estabelecido nenhum controle das variáveis que influenciam o processo de deposição. Apesar de praticamente ter sido abandonada na construção das barragens convencionais (Ribeiro, *op.cit.*), a técnica de aterro hidráulico continua sendo usada notadamente no processo de disposição de rejeitos de mineração. Tal condição ocorre devido às características dos rejeitos de mineração e suas condições de transporte, as quais geralmente ocorrem por via hidráulica, forçada ou não (dutos, tubulações, canais), somadas ao fato de se tratar de uma técnica de, relativamente, baixos custos.

Entretanto, os investimentos em projetos de completa elaboração de barragens de contenção de rejeitos têm se tornado cada vez mais comuns, posto que aumentam a segurança e vida útil da obra, associadas à minimização dos danos ao meio ambiente, muitas vezes de complexa avaliação. As principais causas que levam o minerador a investir na construção e monitoramento da barragem de rejeitos são o risco de acidentes e a pressão de órgãos estatais e organizações não governamentais ligados aos problemas ambientais, estes cada vez mais atuantes no Brasil e no mundo. Alguns autores como Machado (1995), Antunes (1998), Barreto (1998) e Milaré (2000 *apud* International Institute for Environment and Development – IIED, 2002) concordam que nas últimas décadas foi criada uma estrutura regulamentadora no Brasil que, apesar de completa, é considerada ampla e dispersa, dificultando a sua análise e gerando conflitos de competências e sobreposições.

Os acidentes implicam em severos e, muitas vezes, imprevisíveis danos ao meio físico, fauna e flora, com graves riscos à vida humana, esta última invariavelmente presente nas proximidades da obra, em escritórios da mineração ou mesmo vilarejos e centros urbanos. Dados divulgados pelo ICOLD (International Commission on Large Dams, 2001) apontam para 221 acidentes com barragens de rejeitos em diversos graus de gravidade, no período de 1939 a 2000, sendo 5 casos brasileiros. Essas informações apresentadas são compostas a partir de dados oficiais, o que implica na ausência de inúmeros outros valores e casos sem relatos oficiais.

Do ponto de vista econômico, as grandes bacias de rejeitos podem ser úteis, no sentido de formarem depósitos minerais com teores e características físicas distintas do minério explorado, com lavra inviável do ponto de vista econômico e tecnológico atual, fato já salientado por Chaves & Fujimura (1991). Mas com a evolução e mudanças de mercado e tecnologia os rejeitos podem proporcionar, num futuro próximo, alternativa e sobrevida à atividade mineral ou ainda à exploração como subproduto (Arnez, 1999, 2004).

A crescente presença de barragens de rejeito com estudos técnicos prévios e de acompanhamento no Brasil, demonstra a crescente consciência do minerador com relação aos benefícios técnico, econômico e ambiental que retornam ao empreendimento. Entretanto, tais atividades não são bem documentadas e divulgadas, com evidente carência de publicações especializadas, sobretudo no que se refere às características e realidades dos projetos brasileiros. Dentro deste quadro nota-se a tendência mundial de padronização dos documentos e procedimentos de referência para avaliação de projetos e controle durante a fase de vida da barragem, ou seja, padronização dos processos de auditorias (International Council on Metals and the Environment & United Nations Environment Programme Industry and Environment, 1998a, 1998b; Mining Association of Canada, 1998), importantes contribuições do ICOLD (International Commission on Large Dams, 1982, 1989, 1994, 1995a, 1995b, 1996a, 1996b).

2. OBJETIVOS

Dentro do quadro apresentado, de crescente importância dos rejeitos de mineração e de seus projetos, está inserido o presente estudo visando avaliar e comparar as praias de sedimentação por deposição hidráulica formadas com diferentes tipos de rejeitos (peso específico, mineralogia, arredondamento, esfericidade, granulometria) submetidos a diferentes condições hidráulicas de lançamento (concentração) e suas respectivas características geológico-geotécnicas. Motiva essa pesquisa a ausência de estudos e avaliações, em especial, no que tange à comparação de diferentes rochas fonte no comportamento de sedimentação e sua importância para elaboração de projetos, uma vez que estes materiais muitas vezes servem de fundação no processo de alteamento de barragens de rejeito.

Assim, o presente estudo objetiva apresentar, avaliar e comparar diferentes rejeitos de mineração, de diferentes empreendimentos mineiros, empregados no alteamento de barragens de contenção em operação, considerando-se seu comportamento quando submetidos a lançamento hidráulico e a formação da praia de sedimentação.

Concomitantemente ao estudo do material depositado na praia de rejeitos, foi utilizado um tanque de escala reduzida a fim de avaliar a reprodução das condições de lançamento e, com isso, do padrão de deposição observadas em campo.

O resultado final será o quadro das características de rejeitos provenientes de diferentes tipos de minérios e seus respectivos comportamentos em praias de depósitos de aterro hidráulico.

A integração dos dados permitirá a elaboração de texto ilustrativo com detalhes técnicos e discussões sobre os tipos de rejeitos, as variações da deposição hidráulica e dos comportamentos geológico-geotécnicos das praias em barragens de contenção de rejeitos. Desta forma, será elaborado um quadro geológico-geotécnico destes depósitos hidráulicos o qual permita estabelecer modelos de características geológico-geotécnicas e geometria das praias de barragens de rejeitos de mineração para previsão de comportamentos de depósitos similares e, assim, dar suporte aos projetos e obras similares desta natureza contribuindo para o

crescimento técnico e científico da área, com a elaboração de futuros projetos mais seguros e ambientalmente menos danosos.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. *Barragens de rejeito*

As barragens de rejeito são estruturas construídas com a finalidade de armazenar os materiais provenientes da lavra e beneficiamento de minérios, tradicionalmente denominados rejeitos. Devido à grande diversidade de minérios processados e dos tratamentos adotados, podem ser encontrados rejeitos com variadas características e propriedades geológicas e geotécnicas (Nash, 2000a, 2000b, 2002a, 2002b).

Isto ocorre em função das variações significativas de concentração da polpa, mistura de sólido e água, das características físicas e químicas dos materiais e, portanto, notadamente do comportamento reológico. Os rejeitos depositados podem ser muito plásticos, tradicionalmente denominados de lamas, compostos essencialmente por material argiloso, ou ainda, materiais não plásticos, tais como siltes e areias que apresentam granulometria mais grossa e são também denominados rejeitos granulares (Espósito, 2000).

Abrão (1987) afirma que esta variação granulométrica observada nos rejeitos normalmente é acompanhada por características mineralógicas, geotécnicas e físico-químicas variáveis, em função do tipo de minério processado e processo adotado. Esta variação mineralógica é caracterizada pela presença, ao longo da barragem, de minerais mais resistentes física e quimicamente em contato com minerais especialmente mais susceptíveis a contração, expansão e alteração e transformação química (Arnez, 2004), por vezes acentuada pelo processo de beneficiamento ao qual foi submetido.

Fujimura & Soares (1996) descrevem que as etapas de cominuição (britagem e moagem) são fundamentais para a liberação do mineral útil, resultando, em geral, em grãos menores que 2mm (10#), angulosos, com superfícies cortantes e com fraturas frescas, sobretudo quando o processo é aplicado em rochas frescas. Estas características foram também observadas por Bittar (2006) em estudo de rejeitos de fosfatos, no qual se observa valores de ângulo de atrito para a praia de rejeitos da ordem de 33° medidos em ensaios laboratoriais e estabelecidos por correlações de ensaios SPT.

Do ponto de vista geotécnico ressaltam-se ainda os resultados obtidos por Bittar (2006) a respeito dos valores de permeabilidade, onde se observam variações possivelmente relacionadas aos estratos heterogêneos presentes ao longo da praia, com variações granulométricas verticais refletindo a heterogeneidade dos materiais lançados ao longo do tempo.

Recentemente Cho et al. (2006) analisaram a influência das formas de grãos naturais e daqueles que sofreram algum processo de cominuição (artificiais), nos valores de alguns parâmetros geotécnicos, concluindo que a forma das partículas participa na determinação do comportamento geral do solo. Onde a diminuição dos valores de arredondamento e esfericidade resulta no aumento dos valores de índices de vazios máximos e mínimos, aumento do ângulo de atrito e na diminuição da rigidez (coeficiente α).

Portanto, o comportamento geotécnico dos rejeitos está ligado às características do material, natureza do depósito e na forma como foi depositado. Estes depósitos resultam em duas classes distintas de material: areias lançadas hidraulicamente, que compõem preferencialmente a praia de rejeitos, e lamas depositadas por sedimentação na área da lagoa. Usualmente a granulometria é considerada a característica mais importante do material, determinando o comportamento dos rejeitos.

Existem três métodos básicos para o alteamento de uma barragem de contenção de rejeitos: método de montante, método de jusante e método da linha de centro (Figura 4). A diferença básica na denominação dos diferentes métodos está no deslocamento que o eixo da barragem apresenta durante seus alteamentos sucessivos em relação ao dique de partida. Usualmente, o material utilizado nas diferentes fases de alteamento é o próprio rejeito, sendo adotado o processo de ciclonagem para separação entre sólidos grossos, também denominados de “*underflow*”, empregados na construção da barragem (alteamento), e sólidos finos, denominados de “*overflow*”, lançados no reservatório da barragem (praia/bacia de decantação).

Vários são os trabalhos que apontam as vantagens e desvantagens dos métodos, sendo que o de montante é o mais econômico e de maior facilidade executiva, considerando maior velocidade de alteamento e pouco uso de equipamentos de terraplenagem. Neste método a praia de rejeitos formada a partir da crista, torna-se a fundação para o segundo dique de alteamento, de forma que,

sucessivamente, a barragem vai sendo alteada até atingir a cota máxima especificada em projeto. Diversos autores apontam que esse método é o mais econômico, porém o mais crítico sob o ponto de vista de segurança (Klohn, 1982; Vick, 1990; Krause, 1997; Gregório Filho & Nieble, 1975; Soares, 2001), sendo não recomendado pela norma brasileira de projeto de disposição de rejeitos de beneficiamento, em barramento, em mineração (ABNT, 1993). Assim, podem-se resumir as vantagens e desvantagens entre os métodos conforme apresentado sinteticamente na Tabela 3.

Figura 4 - Seqüência de alteamento de barragens de rejeito pelo método de montante (a), linha de centro (b) e jusante (c). (fonte: modificado de *tailings.info*, 2007).

Conforme já descrito, os rejeitos granulares utilizados como materiais de construção são transportados na forma de polpa, reduzindo substancialmente o custo do transporte desses materiais (Henderson, 1988). Em razão desta característica fundamental a utilização da técnica de aterro hidráulico para a construção dessas barragens se apresenta como uma alternativa viável, evidentemente do ponto de vista econômico, mas também sob o ponto de vista de segurança (Espósito, 2000). Segundo Moretti & Cruz (1996), hidromecanização pode ser definida como o conjunto de processos que envolve o transporte e a deposição de um solo com auxílio de água, de onde se conclui que os aterros hidráulicos são os aterros construídos através de hidromecanização.

Tabela 3 – Métodos construtivos de barragens de contenção de rejeitos.

	Método de montante	Método de jusante	Método linha de centro
Características gerais	<ul style="list-style-type: none"> •Método mais antigo, sendo o mais empregado na atualidade. •Lançamento a partir da crista por “<i>spigots</i>” (as frações grossas se depositam junto ao corpo da barragem). •Também podem ser usados hidrociclones. 	<ul style="list-style-type: none"> •Construção de dique inicial impermeável e barragem de pé. •Separação dos rejeitos na crista do dique por meio de hidrociclones. •Barragem com dreno interno e impermeabilização a montante. 	<ul style="list-style-type: none"> •Variação do método de jusante.
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> •Menor custo. •Maior velocidade de alteamento. 	<ul style="list-style-type: none"> •Maior segurança. • Compactação de todo o corpo da barragem. 	<ul style="list-style-type: none"> •Variação do volume de “<i>underflow</i>” em relação ao método de jusante.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> •Maior probabilidade de instabilidade devido à presença de finos não adensados junto ao corpo da barragem. •Baixa compacidade do material; possibilidade de liquefação. 	<ul style="list-style-type: none"> •Necessidade de grandes quantidades de “<i>underflow</i>” (problemas nas 1^{as} etapas). •Deslocamento do talude de jusante (proteção superficial só no final da construção). 	<ul style="list-style-type: none"> •Pode ser necessária a extensão dos trabalhos de compactação a montante do eixo da barragem.

(fonte: Soares, 2001)

Conforme descrito por Moretti (1988), Espósito (2000) e relatos de Morgenstern & Küpper (1988) os aterros hidráulicos, graças à grande experiência soviética, possuem muitas aplicações tais como construção de barragens para acumulação de água, ilhas artificiais e o objeto principal do presente estudo: barragens de rejeitos. Ainda entre as vantagens deste método para a aplicação em barragens de rejeitos, ressalvada a conveniência de se trabalhar com materiais que já estão na forma de polpa, são citadas a alta taxa de construção, de 200.000m³ / dia (Grishin, 1982) a 300.000m³ / dia (Küpper, 1991), o alto grau de mecanização, relativamente baixo custo, possível aplicação em uma larga faixa de materiais, e ainda, a possibilidade de construção sobre fundações sujeitas a recalques.

Apesar de seu grande potencial de aplicação o histórico revela inúmeros casos de problemas relativos ao desempenho e segurança deste tipo de estrutura em diversas partes do mundo, reportados por Hazen (1920); Negro JR. et al. (1979), Caldwell & Robertson (1986), Hsu (1988); Küpper et al. (1992a); Moretti & Cruz (1996), Septimius et al. (2006), Itzkovitch apud UNEP (2000); Benckert & Eurenus (2001), Nash (2000a, 2002a) e Blight & Fourie (2005), entre outros. Segundo Penman (2001) em todo o mundo são relatados em média 1,7 acidente/ano para os últimos 30 anos. Ribeiro (2000), a partir da análise dos dados existentes, define que

aproximadamente 60% das rupturas ocorreram devido a projetos inadequados e falta de controle dos métodos construtivos.

Borovoi et al. (1982) apresentaram a visão do Comitê Nacional de Grandes Barragens da Rússia e demais repúblicas soviéticas e mostraram que o método de aterro hidráulico era bastante comum, e bem sucedido, na então União Soviética. Ribeiro (2000) relata que na prática soviética as recomendações propostas por Hazen (1920) foram seguidas e mais tarde passaram a ser baseadas na própria experiência adquirida com o emprego e aprimoramento técnico. Baseados nestas experiências, Yufin (1965) e Melent'ev et al. (1973) propuseram as primeiras recomendações de controle construtivo associadas às estruturas de aterros hidráulicos.

Nota-se que, baseando-se nestes estudos e experiências, a norma soviética, SNIP-II-53-73 *apud* Küpper (1991), considera que a mais importante característica a ser observada nos aterros hidráulicos refere-se à distribuição granulométrica do material de empréstimo. A norma recomenda que sejam utilizados preferencialmente os solos correspondentes aos grupos I e II (Figura 5). Os solos do grupo I devem ser utilizados em barragens de seção homogênea e os do grupo II são mais adequados aos aterros heterogêneos. Os materiais com as características do grupo V somente devem ser utilizados na construção dos espaldares e os do grupo IV como material do núcleo. Com relação aos solos do grupo III, algumas restrições e cuidados devem ser tomados, principalmente em relação às velocidades de lançamento.

Assim como a granulometria, o processo de segregação hidráulica é uma característica importante dos aterros hidráulicos, variando sensivelmente em função das condições de fluxo e tipo de fluido, concentração e características dos sedimentos, distribuição granulométrica, bem como de eventuais aditivos químicos presentes no fluido. Neste processo de segregação o fluxo da polpa provoca a seleção de partículas que são depositadas em diferentes locais ao longo da trajetória de fluxo, gerando uma enorme variabilidade deposicional e, portanto, estrutural, alterando parâmetros importantes do barramento, tais como resistência, deformabilidade e permeabilidade.

Figura 5 - Grupos de materiais de empréstimo e suas aplicações de acordo com a norma SNIP-II-53-73. (fonte: modificado de Moretti & Cruz, 1996).

Espósito (2000) descreve que a segregação hidráulica é mais acentuada para altas vazões, baixas concentrações de polpa e relativamente baixas velocidades de fluxo o que significa menor taxa de transporte de sedimentos, o que favorece a segregação hidráulica. Küpper (1991) cita a especificação soviética SNIP-II-53-73, que considera como material de empréstimo para aterros hidráulicos, com um razoável nível de segregação, aquele que atende a relação entre os diâmetros equivalentes na curva acumulada de:

- $D_{60} / D_{10} \geq 2,5$
- $D_{90} / D_{10} > 5$

Moretti (1988) apresenta ainda as considerações dos estudos de Melent'ev et al. (1973) em modelos de laboratório que avaliaram a relação da forma dos grãos na massa específica seca (γ_s), demonstrando que para grãos arredondados o valor de γ_s obtido é essencialmente dependente da não uniformidade do solo, e que para diferentes formas (não perfeitamente esféricas), o valor de massa específica é função de D_{60} e da não uniformidade como apresentado na Figura 6 abaixo.

Figura 6 – Relação entre γ_s e D_{90}/D_{10} . (fonte: Moretti, 1988).

Com base nestas afirmativas os autores desenvolveram um método para determinar a massa específica levando em conta a granulometria e a forma dos grãos, avaliando-se o parâmetro π definido por $(D_{90} \times D_{50}/D_{10})$, o grau de arredondamento médio das partículas em relação à escala de Rabakov (Figura 7).

Figura 7 – Escala de arredondamento de Rabakov (fonte: Moretti, 1988).

Com estes dados chega-se ao chamado $\gamma_{\alpha\beta}$ (Tabela 4) que é o valor de γ_s correspondente a um valor de π de 0,8mm, gerado a partir de dados experimentais.

Tabela 4 – Valores de $\gamma_{\alpha\beta}$.

Forma das partículas	Grau de arredondamento Escala de Rabakov	$\gamma_{\alpha\beta}$	
		Média	Limites
Arredondadas	2-3	1,58	1,55-1,62
Pouco arredondadas	1-2	1,52	1,55-1,55
Angulosas	0-1	1,47	1,45-1,50

(fonte: Moretti, 1988).

Obtém-se o valor $\gamma_s/\gamma_{\alpha\beta}$ da Figura 8 abaixo e então se calcula o γ_s .

Figura 8 – Determinação do γ_s a partir da correção da forma dos grãos. (fonte: modificado de Moretti, 1988).

Como resultado destas variáveis é formada a praia de rejeitos utilizando a técnica de aterros hidráulicos, de modo que as características e propriedades da praia são funções, basicamente, da combinação de características granulométricas, peso específico e forma do material a ser depositado, vazão e do método de descarga.

Dentre os métodos mais comuns de descarga temos por um único ponto ou vários pontos em linha a partir de hidrociclones ou canhões (“spigots”) (Figura 9).

Em geral a geometria da praia de rejeitos é definida por um perfil côncavo, mais inclinado próximo ao ponto de descarga, tornando-se mais suave na parte final da praia (Figura 10). A inclinação média do talude determina o comprimento da praia e este dado se torna importante na avaliação das dimensões necessárias para a realização da obra, área ocupada e, conseqüentemente, na avaliação da localização da lagoa de decantação a montante.

Figura 9 - Métodos de descarga usualmente empregados em barragens de rejeitos, único ponto (a) e vários pontos (b). (fonte: modificado de Ribeiro, 2000)

Figura 10 - Perfil geométrico esquematizado da praia de rejeitos utilizando-se a técnica de aterro hidráulico. (fonte: modificado de Morris, 2004)

Como apresentado, os aterros hidráulicos desenvolvem um perfil côncavo compatível com os parâmetros de fluxo envolvidos. O decréscimo da inclinação com a distância pode ser explicado pela segregação de partículas que ocorre sobre a praia, observando-se que de maneira geral, a praia é mais inclinada na região próxima ao ponto de descarga, onde são depositadas partículas mais grossas, e à medida que se afasta do ponto de lançamento se torna mais suave, onde as

partículas finas começam a predominar. Outro fator que contribui significativamente é a variação na concentração de sedimentos da polpa. Perto do ponto de descarga a concentração e energia são altas, e à medida que se afasta há perda da energia de transporte resultando na deposição dos sedimentos, resultando em talude mais abatido (Blight, 1994; Ribeiro, 2000).

A influência do tamanho da partícula tem sido considerada como um fator fundamental na formação dos taludes de rios e estuários (Gilbert, 1914; Rubey, 1938 e Mackin, 1948) e também dos leques aluviais (Hooke, 1967; 1968). A diminuição da inclinação do talude com a diminuição do tamanho do sedimento e altas vazões de fluxo para os leques aluviais foram observadas por Hooke & Rohrer (1979).

Considerando todos os efeitos que afetam a configuração da geometria das praias de aterros hidráulicos Melent'ev et al. (1973) em estudos empíricos, propuseram a existência de um perfil típico de equilíbrio conforme demonstrado na Figura 10, e descrito pela seguinte equação:

$$\frac{Z}{Z_o} = \left(1 - \frac{x}{L}\right)^m \quad (2)$$

Onde: L é o comprimento da praia; Z_o é a elevação máxima; Z é a elevação no ponto x , e m é o parâmetro adimensional positivo que depende do tipo de material.

Parker (1999), em estudos de casos reais, desenvolveu uma nova equação para leques aluviais e praias de rejeitos, descrita por:

$$S = S_o \left(1 - \left(\frac{x}{L}\right)^2\right)^m \quad (3)$$

Onde: L é o comprimento da praia; x é a distância do ponto mais alto da praia; S_o é a inclinação no ponto $x=0$; S é a inclinação do fundo, e m é o expoente adimensional da concavidade da praia.

O modelo estabelecido por Morris (1993) e Morris & Williams (1997a) para praias de rejeitos é descrito por:

$$Z = Z_o \left(\frac{\exp\left(-\frac{\omega x}{L}\right) - \exp(-\omega)}{1 - \exp(-\omega)} \right) \quad (4)$$

Onde: L é o comprimento da praia; Z_o é a elevação máxima; Z é a elevação no ponto x , e ω é o coeficiente adimensional da concavidade da praia.

Em todos os estudos pode-se notar que as equações são válidas para a região da praia do aterro, submetida a uma condição de deposição aérea, ou seja, no caso do talude dentro da lagoa em que o processo de deposição ocorre por decantação, as equações não são válidas.

Vários ensaios de campo e laboratório têm procurado demonstrar a validade desta equação na previsão do perfil das praias de aterros hidráulicos (Blight & Bentel, 1983; Blight et al., 1985; Fan & Masliyah, 1990; Blight, 1994 e Morris & Williams, 1996, Morris, 2004).

É importante ressaltar que existem dificuldades na aplicação das Equações 2, 3 e 4 em projetos que ainda não tenham sido desenvolvidos ou sem referência passada de casos semelhantes. Neste caso, mesmo que se tenha o conhecimento dos parâmetros m ou ω relativos a um tipo de material ou parâmetros de descarga, somente a relação entre x/L e Z/Z_o é conhecida. Neste caso estes dados não são suficientes para definir o perfil, exceto quando se conhece o valor de Z ou L relativos ao protótipo ou ao modelo. A solução para o problema poderia ser a escolha do valor de Z baseado em especificações de projeto e o valor de L poderia ser calculado a partir da posição do sistema de descarga e a extremidade final do aterro; assim obtendo-se a posição final da lagoa de decantação.

Embora descreva de maneira razoável as características geométricas da praia de aterros hidráulicos, o perfil típico apresenta várias dificuldades de obtenção, principalmente na fase de projeto. A determinação das constantes adimensionais é uma tarefa bastante difícil, e, mais complexo ainda, é avaliar os fatores que realmente as afetam.

O que se observa é que, embora vista com restrições, a técnica de aterro hidráulico pode ser considerada viável, principalmente se forem analisadas as características básicas dos projetos, os materiais utilizados a serem utilizados e, principalmente, a metodologia construtiva, isto é, o método de lançamento. Percebe-

se ainda a grande aplicabilidade deste tipo de análise associada à disposição de rejeitos e às vantagens econômicas e técnicas que este tipo de método apresenta.

Entretanto, o que se observa é que existe uma tendência em avaliar o comportamento dos aterros hidráulicos, mas toda a possibilidade de aperfeiçoamento tecnológico esbarra nas dificuldades associadas ao controle de qualidade e à complexidade dos métodos de lançamento. Sabe-se que existem muitas variáveis interferindo no processo de formação destas estruturas, mas que o controle de campo e as simulações em laboratório tendem a gerar dados capazes de melhorar a qualidade técnica dos aterros hidráulicos e talvez, futuramente, poderão estabelecer uma metodologia construtiva viável e segura, principalmente quando aplicados às barragens de rejeitos (Ribeiro, 2000).

3.2. Sedimentação

Diferente de solos naturais, os rejeitos são produtos do tratamento físico e químico realizado artificialmente sobre solos e rochas, portanto, deve-se sempre observar que são materiais oriundos de processos de britagem e moagem, com peculiaridades quando examinados sob o ponto de vista geológico, em analogia com casos naturais, ou mesmo no comportamento geotécnico, utilizando-se a mecânica dos solos (Lopes, 2000). Em comum com os solos naturais, os rejeitos apresentam a propriedade fundamental de estarem na forma de partículas desagregadas, tal como descrito em sedimentos arenosos naturais e em materiais mais finos, fração argila, a coesão.

As características e propriedades dos sedimentos são objetos de inúmeros trabalhos desenvolvidos ao longo de décadas e para diversos fins, sobretudo por geólogos, engenheiros e físicos. Considerando uma abordagem interdisciplinar e voltada aos objetivos do presente estudo, são apresentadas a seguir algumas considerações importantes a respeito do movimento dos sedimentos relacionadas ao processo de deposição hidráulica.

No processo de construção dos aterros hidráulicos são adotados pontos de lançamento (“*spigots*”) de onde são descarregadas misturas de material sólido (sedimento/rejeito) e líquido (água) denominadas polpas. As polpas apresentam concentração variável entre 15% e 55% de sólidos, sendo que com o emprego de espessadores é possível a obtenção de polpas na faixa entre 40 e 50% (Vick, 1990).

Geralmente o padrão das condições de sedimentação a partir destes pontos de lançamento se assemelha aos casos de depósitos naturais de leques aluviais, como observado na Figura 11. Os leques aluviais se desenvolvem, espalhando-se uniformemente de forma radial. Assim, Paola et al. *apud* Parker (1999) demonstram através de seus trabalhos que a forma de distribuição e o transporte dos sedimentos em leques aluviais podem derivar das regras básicas que governam o fluxo e transporte de sedimentos em canais de rios. Evidentemente considera-se que a diferença fundamental entre os dois tipos de sedimentação está no fato de que no caso de aterros hidráulicos os pontos de lançamento são deslocados periodicamente

ou ocorrem de modo concomitante, gerando depósitos justapostos lateralmente, com possíveis interferências e perturbações dos depósitos.

Figura 11. Bloco diagrama ilustrativo de leque aluvial. (fonte: modificado de Allen, 1984)

Nos dois exemplos os fluxos da mistura água-sedimento, denominada polpa, podem ser diferenciados, considerando-se em termos de concentração, caracterizando os fluxos como não-Newtoniano ou quase-Newtoniano conforme Figura 12 (Graf, 1984), o que significa que as partículas sólidas permanecem por mais tempo em suspensão.

Figura 12 - Classificação do fluxo pela concentração de sólidos. (fonte: modificado de Graf, 1984).

Entretanto, outros estudos revelam que para fluxos hiperconcentrados, compostos predominantemente por sedimentos grossos (maiores que areia fina), mantêm-se as propriedades de fluxos Newtoniano (Chien & Wan, 1999), com transporte em carga de fundo e suspensão.

Especialmente no caso de fluxo Newtoniano é possível distinguir com maior clareza o transporte em carga de fundo e suspensão. O deslocamento dos grãos pode ser então classificado como: tração e saltação em carga de fundo e suspensão, como indicado na Figura 13.

Figura 13 – Representação do transporte de sedimentos (modificado de Best & Foulke, 2007).

Outro fator hidrodinâmico importante é o número de Reynolds (Re) usado para caracterizar dois diferentes tipos de comportamento do fluido em escoamentos, denominado de fluxo laminar e turbulento. Este coeficiente adimensional é obtido a partir da equação:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (5)$$

Onde ρ é a densidade; v a velocidade; μ a viscosidade do fluido e L o comprimento (Allen, 1984).

Sendo que o fluxo é considerado laminar para valores de nº de Reynolds abaixo de 500, transicional entre 500 e 2000 e acima deste valor é considerado turbulento (Graf, 1984). Mclane (1995) ressalta que para valores baixos é necessário: baixa velocidade média, baixa densidade ou alta viscosidade.

Outro importante coeficiente da dinâmica dos fluidos é o número de Froude (Fr) que classifica as diferenças nos fluxos segundo a expressão:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gD}} \quad (6)$$

Onde v é a velocidade do fluido; g a força gravitacional e D a profundidade do canal (Graf, 1984; Suguio, 1980). De forma que são classificados em escoamentos subcríticos para $Fr < 1$ (inferior) e supercríticos para valores de $Fr > 1$ (superior).

Os materiais desagregados podem ser avaliados do ponto de vista individual (partícula) ou ainda da sua mistura (Chien & Wan, 1999) sendo que do ponto de vista prático têm-se muito maior interesse nas características e comportamento da sua mistura, tradicionalmente denominada como sedimentos.

Em termos de características individuais das partículas podem ser observadas propriedades como: tamanho do grão, forma, mineralogia, peso específico, textura superficial e orientação; as quais se transformam, quando analisadas em grupo, em: distribuição granulométrica, porosidade, permeabilidade, ângulo de atrito interno e coesão.

Conforme apresentado por Ribeiro (2000) deve-se observar que a velocidade de fluxo necessária para mover uma partícula é função dos números de Reynolds e Froude, e do tamanho e peso da partícula. Assim, Suguio (1980) ressalta que diversos experimentos e estudos teóricos têm sido realizados para determinar as velocidades críticas de fluxo, ou seja, quando há início de movimento em uma parcela significativa do material do leito, para diferentes tamanhos de sedimentos. Dentre estes estudos destaca-se o realizado por Hjulström (1935) que mostra a relação entre velocidade e granulometria no comportamento de erosão, transporte ou deposição, conforme apresentado na Figura 14, ou ainda utilizando-se o diagrama de Shields, apresentado na Figura 15, modificado.

Sundborg (1956), Kuenen (1965) e Postma (1967) *apud* Suguio (1980) demonstram em seus estudos de laboratório que depósitos sedimentares constituídos de partículas minerais menores que $100\mu\text{m}$ apresentam grande coesão, dificultando o processo de erosão e transporte com aumento da velocidade.

Figura 14 - Variação da velocidade crítica (início de transporte) em função do tamanho das partículas. (fonte: modificado de Hjulström, 1965)

Figura 15 – Limites entre início de transporte e sedimentação em função do tamanho das partículas e tensão de cisalhamento. (fonte: modificado de Allen, 1984)

Morgenstern & Küpper (1988) relatam que a segregação hidráulica em barragens de rejeitos gera um processo de deposição, em que partículas de diferentes tamanhos são depositadas em diferentes distâncias em relação ao ponto de lançamento. Assim, a segregação da polpa possibilitaria a deposição de frações mais grossas dos sólidos mais próximos do ponto de descarga e a fração mais fina mais longe, sendo carreadas pelo fluxo. Então, o tamanho médio dos grãos decresceria e o coeficiente de uniformidade e a quantidade de finos aumentaria com a distância do ponto de descarga.

Abadjiev (1985) sumariza alguns métodos para determinação da distribuição granulométrica ao longo das praias de aterros hidráulicos formados por areias utilizando canhões (*"spigots"*). Blight & Bentel (1983) desenvolveram uma relação para avaliar o processo de segregação que ocorre nos aterros hidráulicos e obtiveram uma boa concordância analisando o processo de deposição de rejeitos de ouro e platina.

Com relação ao parâmetro densidade apresentado por Ribeiro (2000), observa-se na Figura 16 que em partículas pequenas, porém mais pesadas, as mesmas apresentam a característica de movimento com a mesma velocidade que os grãos de quartzo mais grossos. Este tipo de comportamento justifica a presença de minerais finos e pesados, em regiões de alta energia de deposição, disseminados com partículas maiores de quartzo. Esta relação é particularmente importante nos casos em que o material analisado é composto em grande parte por minerais com densidades elevadas como ocorre nos rejeitos de mineração, notadamente aqueles resultantes do aproveitamento de minérios metálicos.

A relação entre densidade e tamanho de grão é explicada pelas leis de Stokes e Newton (Luz et al., 2004). Essas leis mostram que a velocidade terminal da partícula, em um dado fluido, é função do tamanho e da densidade da partícula. Assim quando duas partículas têm a mesma densidade, a partícula com maior tamanho terá maior velocidade terminal; e por outro lado se duas partículas têm o mesmo tamanho, a partícula mais densa terá maior velocidade terminal.

Selley (1988) ressalta que esta característica é válida considerando-se partículas de forma semelhante, e que algumas diferenças na forma da partícula tendem a influenciar significativamente no mecanismo de transporte e conseqüentemente no valor da velocidade crítica. Particularmente, este comportamento de mesma característica hidrodinâmica pode ser utilizado para separação mineral como demonstrado pelas curvas do diagrama apresentado na Figura 17, com curvas de igual velocidade de deslocamento com diferentes densidades e diâmetros, e que demonstra a faixa limite de ação da lei de Stokes, usualmente considerada válida para partículas menores que 100 μ m.

Figura 16 - Gráfico esquemático da velocidade de sedimentação em relação ao diâmetro do sedimento. (fonte: modificado de Selley, 1988)

Figura 17 - Gráfico de velocidade de deslocamento (isocinéticas) para deslocamento de partículas com diferentes diâmetros e densidades (fonte: modificado de Heywood, 1953)

Winkelmolen (1982) afirma que para responder às questões a respeito das condições dinâmicas nas quais o sedimento foi depositado, é preciso descrever as propriedades das partículas que são relevantes ao processo, que não se fazem esgotadas com a avaliação de tamanho, mas também com a densidade e a forma.

Os diversos trabalhos de Morris (1993, 2006), Morris & Williams (1996, 1997a, 1997b, 1998), Williams & Morris (1989), analisando diferentes rejeitos, revelam que existe um padrão de distribuição e deposição dos sedimentos nas praias de barragens de rejeitos, expressando também o perfil da praia. Isto ocorre utilizando o valor adimensional do tamanho da partícula expresso por:

$$D^* = D \left(\frac{(G_s - G_f)g}{\nu^2} \right)^{1/3} \quad (7)$$

Onde D^* é o valor adimensional do tamanho da partícula, D é o tamanho característico da partícula (mediana), G_s peso específico da partícula, G_f peso específico do fluido, ν a velocidade, e g aceleração gravitacional.

Esta expressão é válida para condições de simulação em laboratório para deposição subaérea e para G_s constante, mas não confirmado para condições reais nas praias de rejeitos.

Küpper (1991), que avalia barragem de rejeitos em sua tese, descreve que após a polpa ser descartada, os grãos tendem a se depositar ou fluir próximo à superfície do aterro constituindo o transporte de fundo ou carga de tração, sendo que o processo de segregação cria uma situação de fluxo sobre um contorno erodível. Como o fluido circula sobre uma superfície com contornos erodíveis, uma interação entre o fluxo e o material do contorno é estabelecida. O contorno é sucessivamente alterado pelo fluxo e pelo material depositado. Dessa forma a configuração da camada superficial estará sempre em transformação em função dos processos erosivos e/ou pelo acúmulo de material depositado. Os sedimentos se movem e criam uma organização resultando em diferentes formas de leito. O contorno móvel também provoca a deformação das linhas de fluxo e a imposição da resistência ao fluxo (rugosidade da camada). Assim, uma interação complexa é desenvolvida entre as estruturas turbulentas do fluxo e as propriedades físicas e geométricas das camadas.

O escoamento do fluido sobre um contorno rugoso aplica tensões de cisalhamento; quando as tensões excedem a certo valor crítico, os solos granulares começam a se mover. Após esse estágio, um pequeno acréscimo na velocidade do fluxo pode provocar um movimento entre os grãos, de forma que as camadas se tornem cobertas por uma outra pequena camada de formas assimétricas e onduladas, denominadas ondulações.

Esta descrição está de acordo com o esperado para os rejeitos que têm tamanho dos grãos na faixa granulométrica de areia. Este comportamento segue o padrão sinteticamente apresentado na Figura 18.

Figura 18 - Diferentes formas de leito em fundos incoesivos e suas relações com a granulometria para diferentes regimes de fluxo. (fonte: Suguio, 1980)

O aumento da energia para uma mesma faixa granulométrica inicia-se com a formação de pequenas ondulações. Este tipo de movimento gera depósitos que apresentam uma pequena escala de estratificação, porém com uma alta taxa de deposição de sedimentos, podendo desenvolver estratificações onduladas (Allen, 1970, 1984).

Com o contínuo aumento na velocidade, desenvolvem-se ondulações maiores denominadas dunas subaquáticas, que contribuem para o aumento da taxa de transporte de sedimentos. As dunas são similares às pequenas ondulações em sua forma geral, mas são dominadas por fenômenos que ocorrem na camada limite e não apenas devidos à viscosidade. Conseqüentemente, as características das

dunas dependem da profundidade do fluxo e as seções formadas apresentam estratificações em larga escala (Allen, 1970, 1984).

Quando a velocidade da corrente é aumentada (número de Froude maior que 1), as macro-ondulações desaparecem e a superfície se torna plana, marcando a transição dos regimes de fluxo inferior e superior.

O leito plano que segue o estágio de transição apresenta uma baixa resistência ao fluxo e está associado a um intenso transporte de sedimentos com a maioria do material transportado sendo confinado a uma zona delgada próxima ao leito (carga de fundo). O leito plano do estágio superior tem uma estrutura interna plana e laminações quase horizontais variando de 5 a 10 vezes a espessura do grão (Leeder, 1985).

Depois que o regime superior da camada plana é estabelecido, um aumento na velocidade causa a formação das antidunas. Neste estágio a resistência ao fluxo é pequena e o transporte de sedimentos é grande.

Assim Espósito (2000) com base em Küpper (1991) conclui que os materiais granulares depositados sob diferentes condições desenvolvem estruturas sedimentares distintas, com diferentes texturas e estruturas e, conseqüentemente, diferentes comportamentos geotécnicos.

Küpper (1991) destaca que devido a um nível relativamente alto dos valores de descargas típicas de polpa e a alta concentração de sedimentos, ondulações e dunas não ocorrem sob condições de aterro hidráulico, exceto em áreas localizadas na parte baixa da praia. Geralmente sob essas condições, o regime de fluxo é o estágio superior com configurações de camadas planas e antidunas.

Vale ressaltar que a deposição da fração fina, argilosa, presente nas lamas que atingem o lago de decantação difere completamente dos processos de formação de praias anteriormente descritos, visto que a deposição das argilas caracteriza-se quase que exclusivamente por movimentação vertical.

3.3. Simulação hidráulica

Para poder resolver diversos problemas, freqüentemente a engenharia lança mão de modelos, seja na forma de módulos matemáticos ou digitais. Os modelos podem ser uma representação física do problema ou ainda uma equação ou um conjunto de equações que descreve o funcionamento do dispositivo ou sistema. Dentro dessas possibilidades a simulação física com modelos reduzidos, normalmente usados em engenharia hidráulica e engenharia naval pode ser útil na elaboração de novas equações ou no refinamento da mesma para cálculos mais precisos e confiáveis em diversos projetos e análises do comportamento real.

Neste contexto, existe uma grande aplicabilidade na utilização de modelos físicos de simulação em laboratório visando estudar o comportamento de processos hidráulicos e de sedimentação, no qual estão inclusos os aterros hidráulicos. Nos ensaios de simulação em canais artificiais denominados “*flumes*”, os mecanismos de deposição podem ser observados de perto e os ensaios podem ser desenvolvidos de forma mais econômica e controlada, isolando-se variáveis, do que no campo. Além disso, é possível a realização de um grande número de ensaios simulando os efeitos das variáveis que controlam os processos de deposição hidráulica, principalmente vazão, concentração, altura e forma de lançamento dos rejeitos.

Morris & Williams (1996) apresentam estudos relativos à similaridade cinemática dos modelos e protótipos, que é assegurada pela semelhança entre os parâmetros de descarga e contornos de fluxo dos mesmos, considerando que a semelhança completa é fisicamente impossível nestes tipos de modelos hidráulicos. Assim, os modelos de uma forma geral privilegiam semelhanças dos parâmetros dominantes, enquanto asseguram que os outros efeitos sejam os menores possíveis, adotando-se algumas simplificações (Ribeiro, 2000).

Hooke (1968) mostra os problemas inerentes às modelagens de fluxos naturais e sedimentos, e, às dificuldades associadas à aplicação de uma modelagem em escala formal, tem desencorajado diversos pesquisadores não especializados em hidráulica a realizar estudos envolvendo simulações.

O autor, avaliando o histórico de trabalhos de simulação, propôs um critério informal de similaridade, no qual outro tipo de aproximação poderia se concentrar

em um “processo de similaridade”, em que os sistemas de simulação em laboratório são tratados como sistemas reduzidos, semelhantes ao modelo real (protótipo), mas não uma versão em escala do mesmo (modelo).

Assim, algumas condições mínimas devem ser produzidas para a realização das simulações em laboratório pelo processo de similaridade:

- deve ser alcançado um padrão de escala geral no qual é estabelecida uma escala básica entre o modelo e o protótipo, mantendo-se o número de Reynolds e de Froude;
- o modelo deve reproduzir as características morfológicas básicas do real (protótipo), caracterizado pelo processo de descarga, estrutura da camada, padrão de deposição, tipo de sedimento, densidade, etc.;
- os mecanismos responsáveis por características no modelo devem ser considerados como semelhantes ao protótipo.

Hooke (1968) considera que embora simples, a aproximação dos sistemas de laboratório através do processo de similaridade, represente uma alternativa produtiva de obtenção de dados, formulação de hipótese e respostas para entendimento qualitativo dos fenômenos naturais.

De todo o exposto, a utilização da simulação de deposição hidráulica em aterros já executada por Ferreira et al. (1980), Blight et al. (1985), De Groot et al., (1988), Boldt (1988), Fourie (1988), Fan & Masliyah (1990), Winterwerp et al. (1990, 1992), Küpper (1991) e Küpper et al. (1992a, 1992b), e recentemente Ribeiro (2000), analisando diferentes parâmetros, contribuem para a presente pesquisa uma vez que todas focam seus esforços no conhecimento dos mecanismos de aterro hidráulico e portanto no controle da qualidade do processo construtivo, notadamente sob o ponto de vista geológico e geotécnico.

Em geral a maioria destes ensaios representa uma avaliação global do processo de deposição hidráulica. A maioria dos estudos está relacionada com a previsão do talude de equilíbrio para uma condição específica de fluxo. Além disso, alguns deles apresentam resultados relevantes às características físicas e mecânicas dos aterros formados. As principais diferenças encontram-se relacionadas ao arranjo físico e às características do sistema de alimentação e descarga.

Ferreira et al. (1980), mostram as simulações realizadas nos estudos da barragem de Porto Primavera, seguindo a metodologia e a norma soviética, baseada principalmente na adoção de ensaios de simulação de deposição hidráulica em laboratório. Este procedimento foi extensivamente utilizado pelos soviéticos até a consolidação do método e o estabelecimento de tecnologias e normas de construção. Com a normalização e utilização em larga escala do processo de hidromecanização, os ensaios de laboratório passaram a ter um uso restrito na rotina soviética (Filimonov, 1979).

Um equipamento de simulação foi construído, constituído de um canal de 11,0m de comprimento, 0,8m de largura e 0,8m de altura, acoplado a um sistema de descarga com alimentação independente de água e areia. O processo de deposição foi realizado com um material tipicamente arenoso de granulometria fina ($D_{50}=0,140\text{mm}$) oriundo das áreas de empréstimo. A água era descarregada através de um vertedouro e a areia através de um dispositivo de controle e então, antes de entrar no canal, a água e a areia eram misturadas num tubo vertical que abastecia os vários bocais instalados em diferentes alturas. Os bocais tinham um pequeno prolongamento direcionado para cima, possivelmente para diminuir o impacto da descarga, e à medida que o aterro era preenchido o bocal imediatamente superior era aberto.

Uma válvula de controle de drenagem no fundo era usada para controlar o fluxo após o processo de deposição, mantendo uma velocidade de fluxo da ordem de 4cm/h. Três testes foram realizados com concentrações ao redor de 10% e vazão de 3,3 a 13 cm^3/s . Após os ensaios foram coletadas alíquotas para análise granulométrica e densidade, e amostras indeformadas para determinação da permeabilidade, compressibilidade e cisalhamento. A formação de meandros foi reportada e foram medidas diferenças entre a permeabilidade vertical e horizontal (k_h/k_v) de 1 a 10 vezes.

A Figura 19 apresenta um esquema geral do equipamento utilizado por Ferreira et al. (1980).

Figura 19 - Arranjo físico do equipamento utilizado por Ferreira et al. (1980).

Blight et al. (1985) apresentam detalhes dos ensaios de simulação de deposição hidráulica realizados na África do Sul. O objetivo destes ensaios era estudar o conceito do perfil típico proposto por Melent'ev et al. (1973) o qual é formado independentemente da escala. Os ensaios foram realizados com diferentes tipos de rejeitos de mineração de ouro, cobre, platina, bauxita e carvão adotando valores de concentração de 50, 60 e 70%. O canal de deposição usado era de pequena dimensão com um comprimento de aproximadamente 2,0m e o sistema de alimentação consistia em um reservatório único de 220 l, com ponto de descarga localizado na base do reservatório.

Blight et al. (1985), embora usando um reservatório único para água e sólidos, não apresentam detalhes de como a concentração da lama era mantida constante durante o processo de descarga e tampouco a maneira como a lama era descartada no canal e os valores das vazões utilizados. A maioria das análises envolvendo o perfil típico baseou-se em comparações dos valores de concentração no campo e laboratório apresentando o perfil final obtido. Estudos mais recentes apresentados por Blight (1994) seguem esta mesma linha de pesquisa e as informações referentes aos ensaios e equipamento são também limitadas. Entretanto, alguns dados sobre a segregação e a distribuição granulométrica são apresentados evidenciando sua influência na configuração global do perfil da praia obtida.

Boldt em 1988 em ensaios realizados pelo US Bureau of Mines Research Centre, localizado no estado de Washington (EUA), utilizando rejeitos de cobre e prata ($D_{50} = 0,0135\text{mm}$) e rejeitos de uma mineração de cobre, prata e chumbo ($D_{50} = 0,097\text{mm}$). O rejeito era misturado com água em um tanque de alimentação de 6400 litros e em seguida bombeado para dentro do canal de deposição a uma vazão constante. A vazão adotada nos ensaios variou entre 58 e 130 l/min, e a

concentração entre 20 e 57% em cada ensaio. Nestes estudos ocorreram alguns distúrbios no fluxo provocados pelo efeito das paredes do canal e uma conseqüente alteração na formação do depósito.

Depois do processo de lançamento, o material depositado foi parcialmente drenado e amostras foram coletadas ao longo da praia para a realização de ensaios de cisalhamento, permeabilidade e granulometria.

Os ensaios do grupo de Delft, Holanda, foram realizados dentro de um programa experimental e teórico associado ao estudo do comportamento dos diques de contenção construídos na parte sudeste da Holanda apresentados por De Groot et al. (1988), Winterwerp et al. (1990), e Winterwerp et al., (1992). As análises realizadas visaram basicamente aperfeiçoar o processo construtivo destas estruturas e melhorar a qualidade da metodologia construtiva empregada.

Dois equipamentos de simulação de deposição hidráulica com diferentes dimensões foram utilizados para analisar três tipos de areias de granulometria fina a média. Os valores de concentração adotados variaram entre 32 e 68% e a vazão de descarga de sedimentos variou entre 7 e 35 l/min para o equipamento de pequena escala. Para o equipamento de grande escala (Figura 20), os valores de concentração mantiveram-se próximos aos adotados no equipamento de menores dimensões, porém cobrindo uma faixa maior, entre 0 e 64 % e os valores da vazão variaram de 180 a 2700 l/min e (De Groot et al., 1988).

Winterwerp et al. (1990) considera que o perfil de equilíbrio é alcançado quando existe um balanço entre a sedimentação e a erosão, formando um sistema dinamicamente estável que é responsável pela configuração global da geometria do depósito.

Ribeiro (2000) ressalta que os autores observaram a formação de depósitos mais suaves quando a velocidade de fluxo é pequena e o processo de sedimentação é preponderante em relação à erosão. Entretanto, para altas velocidades, o fluxo tende a erodir a camada já depositada e o talude resultante é geralmente mais íngreme. Adicionalmente, consideram que as mudanças que ocorrem no talude formado são responsáveis pelas variações nos parâmetros obtidos durante e após o processo de deposição.

Figura 20 – Esquema do equipamento desenvolvido em Delft, Holanda. (fonte: modificado de De Groot et al., 1988)

Fourie (1988) apresenta os ensaios que visaram à determinação do perfil típico associado a cada tipo de material estudado na Universidade de Queensland, Austrália. Os rejeitos utilizados foram de granulometria fina, oriundos das minerações de bauxita, níquel e carvão. O equipamento usado nas simulações consistia em um canal de 2,0m de comprimento, 0,6m de largura e 0,6m de profundidade. O sistema de alimentação é constituído por um único reservatório de água e sólidos e dotado de um agitador elétrico que garante os valores da concentração constantes. A descarga da lama no canal era feita através de um controlador de fluxo, constituído de um tubo horizontal com quatro furos de 1,0 cm de diâmetro localizados na parte inferior ao longo da largura do canal. Uma placa de dissipação de energia foi instalada logo abaixo do controlador de fluxo evitando erodir a crista do depósito, minimizando o impacto da descarga. A Figura 21 apresenta um esquema simplificado do equipamento de simulação.

Durante a realização do ensaio, o fluxo de lama era regulado através de uma válvula que mantinha uma vazão constante de $8,30 \text{ cm}^3/\text{s}$, ou seja, cerca de 5 l/min. A formação da lagoa na extremidade final do canal foi evitada pela instalação de um sistema de drenos na mesma cota da base do canal que impedia a concentração da água na porção final do depósito, aumentando o comprimento da praia com deposição sempre acima d'água.

Figura 21 – Esquema simplificado do equipamento de simulação desenvolvido na Universidade de Queensland.
(fonte: modificado de Morris & Williams, 1996)

Küpper (1992b) considera que os materiais utilizados se comportaram como lamas não segregáveis e desta forma não podem ser comparados com outros ensaios de simulação reportados na literatura, por apresentar reologia distinta. Nas lamas não segregáveis, os sólidos e o fluido não se comportam independentemente, atuando como um fluido viscoso e neste caso os fenômenos físicos envolvidos são totalmente distintos. Verifica ainda que durante o processo de deposição os grãos se depositavam rapidamente próximo ao ponto de descarga e logo eram arrastadas pelo fluxo de material subsequente que atingia a camada. Observa-se que, embora utilizando partículas finas, o mecanismo de transporte predominante foi de arraste de fundo.

Fan (1989) e Fan & Masliyah (1990) apresentam os resultados dos ensaios da Universidade de Alberta, Canadá, que tinham o objetivo de estudar a variação do perfil da praia de aterro hidráulico em função do tempo e da distância ao ponto de descarga para diferentes valores de concentração e vazão de descarga. As características do equipamento utilizado foram: canal com 4,87m de comprimento, 0,3m de largura e 0,5m de profundidade. O material utilizado foi uma areia média à fina ($D_{50} = 0,267\text{mm}$) e concentrações em torno de 14%. Um sistema de alimentação independente descarregava os sólidos e a água em um alimentador mecânico que assegurava a concentração e a vazão constantes durante o ensaio. O material

excedente da deposição era coletado e decantado na parte final, visando avaliar a quantidade de sedimentos que não era depositada durante a evolução do ensaio.

Os dados obtidos a partir dos ensaios de simulação foram utilizados de forma sistemática nas formulações matemáticas para determinação do perfil, baseadas, principalmente, nos diferentes parâmetros de descarga. Fan & Masliyah (1990) relatam a influência da concentração da mistura na inclinação do talude e sobretudo na velocidade de crescimento do depósito. Embora as variações nas vazões de fluxo tenham apresentado pouca influência na inclinação do talude, seu efeito foi considerável na velocidade de evolução do depósito (Ribeiro, 2000).

Küpper (1991) e Küpper et al. (1992a, 1992b) apresentam os ensaios realizados em equipamento do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Alberta, Canadá.

O equipamento utilizado nas simulações em laboratório consistiu de um canal de 6,1m de comprimento, 0,6m de largura e 1,2m de profundidade. O sistema de alimentação era independente e a mistura era formada pela descarga conjunta de água e areia em um funil de alimentação acoplado ao controlador de fluxo. A entrada de água era controlada por um medidor de fluxo e a areia era descarregada através de um vibrador helicoidal que controlava a quantidade de areia necessária para atingir a concentração pré-definida e mantê-la durante os ensaios. A polpa era descarregada no canal por um equipamento que mantinha o fluxo uniforme em toda largura do canal. Este controlador de fluxo contava ainda com finas palhetas metálicas dispostas internamente procurando assim, minimizar os efeitos provocados pelas paredes do canal.

Os ensaios iniciaram-se com um programa experimental envolvendo a avaliação do comportamento, durante e após o processo de deposição, no equipamento de simulação de deposição hidráulica, utilizando três tipos diferentes de areias submetidas a valores de vazão e concentração variáveis sobre uma camada plana de areia pré-depositada no fundo do canal. Os ensaios foram realizados pela deposição da polpa preparada para diferentes valores de concentração em peso variando entre 1,5 a 40% e submetida a diferentes valores de vazão, entre 3 e 20 l/min. A evolução do perfil resultante era acompanhada por meio de medições realizadas em intervalos de tempo durante a deposição e no final do ensaio.

A Tabela 5 apresenta as características básicas das areias utilizadas nestes ensaios de simulação de deposição.

Tabela 5 – Parâmetros médios das areias usadas nos ensaios de simulação em laboratório

Areia	D_{50} (mm)	D_{10} (mm)	% de finos	D_{90}/D_{10}	D_{60}/D_{10}
SS	0,536	0,348	0	3,16	1,70
TS	0,178	0,090	4	3,16	2,17
KS	0,466	0,251	0	3,98	2,18

fonte: modificado de Küpper et al., 1992a

SS – areia comum comercialmente encontrada na região de Edmonton;

TS – rejeito arenoso da Mina de Syncrude em Alberta, obtida nas partes mais altas do depósito;

KS – areia artificial, comercializada pela indústria Kiel como areia 7#.

Os principais parâmetros analisados estão relacionados com as características granulométricas e de densidade do material empregado, vazão de descarga e concentração da mistura e perfil da praia.

Durante a deposição, o fluxo na praia tende a se concentrar em canais, criando meandros que se separam e/ou se juntam ao longo da superfície do depósito, formando pequenos canais preferenciais de fluxo, provocando alterações na configuração do talude pela formação de pequenas ilhas ou barreiras. Para altas velocidades de fluxo, o fluido tende a cobrir toda a extensão do depósito minimizando a influência das ilhas e das barreiras.

O tipo de transporte foi caracterizado pelo arraste hidráulico das partículas que se depositavam rapidamente logo que saíam do controlador de fluxo, tendendo a se movimentar por rolagem e/ou saltação. De acordo com Bagnold (1973) esta camada fina que se move justamente acima da camada estacionária é que constitui a carga de fundo, cujo movimento é devido ao contato sólido-sólido.

Os parâmetros de descarga provocaram alterações no mecanismo de deposição podendo ser observadas lineações e estratificações horizontais nestes tipos de depósitos. Onde havia concentração do fluxo, a velocidade tendia a aumentar, causando ondas na água em fase com o substrato, chamadas antidunas. Além destas estruturas, foram observadas estratificações cruzadas na região de encontro da praia com a lagoa de decantação, possivelmente relacionadas à progradação do depósito.

Com relação ao processo de segregação, os materiais depositados hidraulicamente apresentaram um aumento no valor de D_{50} em função da distância

ao longo do canal. Entretanto, o comportamento usual na seleção hidráulica é que os grãos grossos tendem a se depositar primeiramente e os mais finos tendem a depositar mais distantes do ponto de lançamento. As justificativas encontradas pelo autor para este comportamento atípico foram o alto grau de uniformidade destes materiais e a possibilidade de que as partículas finas possam ter sido removidas durante a deposição. Não foi observada variação dos parâmetros de granulometria em função da variação da concentração ou vazão adotadas. Em relação à densidade, não houve evidências marcantes ou tendências de comportamento em relação à distância do ponto de lançamento. Por outro lado, há variação da densidade do material depositado com mudanças na concentração e vazão da polpa.

Ribeiro (2000) utilizou um Equipamento de Simulação de Deposição Hidráulica (ESDH), desenvolvido em sua tese, onde foram realizadas avaliações da densidade, padrão de segregação, teor de umidade, distribuição granulométrica e massa específica das partículas sólidas ao longo do depósito. O equipamento desenvolvido no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília reuniu a experiência dos diversos estudos citados anteriormente. Esta experiência se traduz na elaboração de um canal de deposição com 6,00m de comprimento, 0,40m de largura e 1,00m de altura, com perfis metálicos e vidro temperado de 10mm de espessura nas paredes laterais. Esta estrutura é capaz de suportar o empuxo provocado pelo material depositado e permite a visualização do processo de deposição ao longo de toda extensão do canal. O canal é alimentado por um sistema de dois reservatórios, interligados por meio de uma bomba especial para sólidos que mantém a recirculação da mistura durante todo o período de realização do ensaio.

A descarga da polpa de rejeitos dentro do canal é feita através de um controlador de fluxo projetado para produzir uma condição constante e uniforme ao longo do canal pelo direcionamento do fluxo sempre paralelo às paredes do canal. O objetivo principal deste controlador foi o estabelecimento de um fluxo unidimensional e minimizar os efeitos provocados pelas paredes. O projeto foi baseado numa proposta inicial apresentada por Küpper (1991) de um equipamento desenvolvido na Universidade de Alberta, Canadá. Na porção mais a jusante do canal foi instalado um sistema de drenos para manter o nível d'água constante na praia, podendo

assim, ajusta a altura de cada de dreno em função da altura do depósito, mantendo uma superfície livre de 1,00m a partir da extremidade final da praia (Figura 22).

Figura 22 – Esquema do equipamento de simulação desenvolvido na Universidade de Brasília (fonte: Ribeiro, 2000)

Ribeiro observa que a presença da lagoa representa um aspecto importante na manutenção da semelhança das características da deposição que ocorre no campo. Neste caso o tipo de aterro hidráulico simulado nestas investigações consistiu de um arranjo com deposição na parte superior da crista na direção de montante e no final do depósito havia a formação de uma lagoa de decantação.

O material utilizado para ensaio em equipamento de simulação hidráulica (ESDH) foi o rejeito de minério de ferro, da Mina de Morro Agudo, pertencente à SAMITRI S.A. (Mineração da Trindade). Este material possui massa específica dos grãos constituintes da ordem de $3,127 \text{ g/cm}^3$, demonstrando a influência da quantidade de ferro presente no rejeito, cerca de 23% (Espósito, 2000), no valor de ρ_s . As demais características básicas do rejeito utilizado por Ribeiro (2000) são apresentadas na Tabela 6, envolvendo características granulométricas e composição química. Este material foi depositado no ESDH utilizando-se valores de vazão de 5, 10 e 20 l/min e três níveis de concentração variando entre 5 e 20%.

Tabela 6 – Características do rejeito de Mina de Morro Agudo.

D ₁₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₉₀ (mm)	Cu	Gs	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)
0,06	0,19	0,48	4	3,13	23	67	0,40

fonte: modificado de Ribeiro, 2000

Com a realização dos ensaios, Ribeiro (2000) afirma que existe um processo contínuo e dinâmico de migração dos canais associados aos eventos de erosão, deposição ou mesmo abandono e retomada de fluxo nos canais. A geometria do depósito avaliado é, de maneira geral, similar à maioria dos ensaios realizados no passado por outros autores, sendo côncava e de baixa inclinação.

O autor revela que, no processo de segregação hidráulica, observa-se total influência do valor da densidade das partículas, e não da granulometria. Esta característica confirma-se pelos dados de granulometria, que revelam tendência de aumento do diâmetro médio do grão (D₅₀) na porção média do talude e um decréscimo deste valor em direção às extremidades e, ainda, pelos parâmetros D₁₀, D₅₀ e D₉₀, o que evidencia a presença de partículas finas, porém mais densas próximas ao ponto de descarga.

O autor demonstra a pequena influência dos valores da concentração e vazão utilizados nas simulações, associando tal comportamento a uniformidade do rejeito em relação ao tamanho dos grãos. Assim, as variações de 0,1 a 0,2mm dos parâmetros granulométricos (D₁₀, D₅₀, D₉₀), ao longo do depósito, são consideradas bastante semelhantes em termos de granulometria.

Entretanto, pode ser feita uma consideração com relação ao aumento da vazão de descarga tendendo a produzir materiais um pouco mais grossos. Este fato pode ser explicado pelo aumento da capacidade de transporte devido ao aumento da vazão, apresentando uma tendência de carregar maiores porcentagens de finos para regiões mais distantes ao longo da trajetória de fluxo. Com relação à concentração não foi observada nenhuma tendência de comportamento relacionada à distribuição granulométrica ao longo do depósito. Maiores valores de concentração e menores valores de vazão geram aterros mais inclinados.

A densidade foi determinada em vários pontos ao longo do depósito, de modo a verificar a tendência deste parâmetro em função da distância do ponto de descarga, onde pode ser observado um considerável aumento dos valores próximo ao ponto de descarga, coincidindo com a região de maior concentração de partículas de ferro. Os resultados obtidos não revelam uma tendência clara de variação em

função da vazão e da concentração, embora se verifique uma leve tendência de aumento da densidade com o aumento da vazão e de decréscimo com o aumento da concentração (Ribeiro, 2000). Este comportamento é compartilhado pela porosidade, onde se observa uma tendência de aumento da porosidade com o aumento da distância ao ponto de descarga.

Desta forma, a porção inicial do depósito apresenta partículas mais densas e baixo índice de vazios, representando a influência do mecanismo de transporte e as características dos minerais de ferro. Inversamente, na porção final do depósito, a configuração do fluxo e as características dos sedimentos que atingiram esta parte do depósito, condicionaram a formação de camadas mais fofas.

A maioria dos ensaios de deposição hidráulica apresentada anteriormente teve o objetivo de estudar o comportamento dos aterros hidráulicos. Entretanto, cada um deles apresenta algumas particularidades relativas à especificidade de cada caso estudado e a ênfase da área predominante da investigação.

Como resultado, as variáveis que foram estudadas e os parâmetros analisados não são necessariamente os mesmos em todos os programas. A Tabela 7 apresenta um resumo das características destes ensaios já descritos anteriormente.

Os materiais utilizados na maioria destes ensaios foram constituídos por sedimentos de granulometria típica de areia fina a média, cujo D_{50} variou entre 0,084 e 0,536mm. Entretanto, os ensaios realizados nos Estados Unidos (Boldt, 1988) e na Austrália (Blight et al., 1985) apresentaram frações com granulometria típica de siltes.

As análises da segregação granulométrica ao longo do processo de deposição foram apresentadas somente por Ferreira et al. (1980), Boldt (1988), Küpper (1991) e Ribeiro (2000). Estes resultados, entretanto, mostram uma limitada segregação, devido principalmente à uniformidade dos sedimentos depositados. Küpper (op. cit.), conforme apresentado anteriormente, mostra um padrão de segregação bastante atípico e Ribeiro (2000) demonstra a forte influência da massa específica dos grãos no padrão de distribuição. Ferreira et al. (1980) relatam a existência de uma zona de transição onde existe um aumento do diâmetro médio do material pelo acúmulo de partículas de granulometria mais grossa, mas em zonas mais distantes e até mesmo no final desta região de transição, já se percebe o aumento considerável de partículas finas. Os autores admitiram que este comportamento estaria associado às

diferenças nos valores do peso específico das partículas mais grossas ($\gamma_{s\text{grossos}} = 2,62$) levemente inferior ao das partículas mais finas ($\gamma_{s\text{finos}} = 2,65$).

Tabela 7 - Diferentes tipos de ensaio de simulação de deposição hidráulica (ESDH).

Referência	Características do ESDH		Características do Ensaio			
	C x L x A (m)	Sistema de Alimentação	D ₅₀ (mm)	Conc. (%)	Vazão Total (cm ³ /s)	CU
Ferreira et al. (1980)	11,0 x 0,8 x 0,8	I	0,140	6,7-9,5	260-1040	-
Blight et al. (1985)	1,8 x 0,3 x 0,6	R	0,023-0,084	50-70	-	27
Boldt (1988)	12,2 x 0,6 x 0,6	R	0,014-0,097	20-57	965-2172	8-22
De Groot et al. (1988)	1,5 x 0,12 x 0,5	R	0,134	32- 68	118-590	-
Fourie (1988)	2,0 x 0,6 x 0,6	R	0,008-0,149	15-50	8.3	2-30
Winterwerp et al. (1990)	9,0 x 0,3 x 0,3	RR	0,120-0,134	0-64	(3-45)x10 ³	-
Fan & Masliyah (1990)	4,9 x 0,3 x 0,5	I	0,267	8-14	114-218	1,7
Küpper (1991)	6,1 x 0,3 x 1,2	I	0,178-0,536	1,5-40,4	53-348	1,7-2,2
Ribeiro (2000)	6,0 x 0,4 x 1,0	RR	0,190	5-20	83-333	4

fonte: modificado de Ribeiro, 2000 e Küpper et al., 1992b

I - Reservatórios independentes de material sólido e água. A mistura ocorre no momento da descarga;

R - Reservatório único dotado de um misturador que mantém a concentração da polpa constante durante o ensaio;

RR - Sistema de recirculação de polpa para um reservatório único dotado de um misturador.

Adicionalmente, pode-se considerar que as diferenças encontradas nos resultados obtidos nos diversos ensaios podem estar associadas à variedade da forma dos grãos, angularidade, características das superfícies do sedimento e diferenças mineralógicas, porém não avaliadas na maioria dos trabalhos.

Com relação ao perfil longitudinal da praia de rejeitos, todos os ensaios apresentaram perfis côncavos e de baixa inclinação, bastante característicos de polpas com comportamento segregável. A variação da concentração e da vazão tende a alterar a configuração do perfil, alterando a inclinação global em cerca de 4 a 5% (Ribeiro, 2000). A granulometria do material também provocou alterações nas características da praia, mostrando que uma combinação de todos estes parâmetros tende a alterar ainda mais a configuração final do depósito.

O objetivo destas comparações foi analisar principalmente a tendência dos resultados e avaliar a sua aplicabilidade na previsão do comportamento dos aterros hidráulicos aplicados a barragens de rejeitos. Observa-se que, embora analisando

resultados e propostas diferentes, existem importantes considerações e semelhanças entre as simulações apresentadas. Os efeitos das variáveis de fluxo e características do processo de deposição são claramente percebidos, mostrando importantes tendências capazes de caracterizar os depósitos formados em função destes parâmetros.

Em resumo, o processo de similaridade apresentado e discutido por Hooke (1968) é uma aproximação direta que fornece uma base para geração de hipóteses e que pode revelar informações a respeito dos processos e tendências de comportamento, associados às conclusões qualitativas extraídas do sistema experimental e aplicadas ao sistema de campo. A maioria dos ensaios de simulação de deposição hidráulica tem sido proposta com base neste princípio. As análises realizadas apresentam geralmente um caráter puramente qualitativo e na proposta apresentada por Ribeiro (2000) foi estabelecido o modelo físico aplicado neste trabalho, que será apresentado em detalhes no capítulo “4. *Materiais e Métodos*”.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa abrange os seguintes aspectos:

1. Documentação e registro das minerações (fluxograma de processos) para determinar variáveis condicionantes das características dos rejeitos;
2. Características e análise da deposição hidráulica (análise de campo)
 - a. características da barragem,
 - b. linha de amostragem dos rejeitos (granulometria, densidade, arredondamento e esfericidade - forma, mineralogia);
3. Características e análise da deposição hidráulica (modelo em escala reduzida)
 - a. características do tanque e escala,
 - b. controle da vazão, altura e concentração de lançamento;
 - c. caracterização dos rejeitos depositados (granulometria, densidade, arredondamento e esfericidade - forma, mineralogia);
4. características e análise dos depósitos em praias de rejeitos
 - a. características geológicas,
 - b. considerações geotécnicas.

Para tanto são apresentados a seguir os materiais, etapas e procedimentos específicos adotados.

4.1. *Materiais*

Foram escolhidas três (03) minerações, com seus respectivos rejeitos, que lavram substâncias do quadro das 22 principais substâncias minerais da Produção Mineral Brasileira (PMB) exposto na Figura 2 (Capítulo 1 – Introdução).

O objetivo desta pesquisa foi conciliar o fornecimento de diferentes materiais e seus respectivos processos de extração, beneficiamento e lançamento dos rejeitos com a disponibilidade do fornecimento de informações por parte das mineradoras. A amostragem dos materiais que atenderam a estas prerrogativas foi realizada no principal estado extrativista brasileiro, Minas Gerais, o mais antigo e o de maior relevância.

Foram selecionadas aquelas que produzem grande quantidade de rejeitos como o ferro do Circuito Mariana da Companhia Vale do Rio Doce - CVRD, e as que estão localizadas próximas a centros urbanos, como o fosfato da Bunge Fertilizantes da região de Araxá, MG. Em ambos os casos as mineradoras são detentoras de barragens de rejeito em fase de alteamento sendo consideradas de grande porte (superior a 15 metros de altura).

Ao longo do período de consulta às minerações foram verificadas as disponibilidades de fornecimento de documentação técnica, sobretudo de projetos das barragens e quadros esquemáticos sobre o fluxograma operacional do empreendimento, do beneficiamento de minério e do lançamento em barragens de rejeito, com especial atenção ao último processo.

É importante salientar que a escolha de dois rejeitos de uma mesma substância mineral, no caso o ferro, deve-se aos objetivos de observar e avaliar possíveis diferenças nas características e no comportamento geológico-geotécnico dos materiais ao longo das praias de rejeitos mesmo para materiais considerados, a princípio, similares.

4.1.1. Araxá – Bunge Fertilizantes S/A

A Bunge Fertilizantes S/A, antiga Arafertil, atua em diversos segmentos da cadeia produtiva dos fertilizantes, operando desde a lavra e beneficiamento da rocha fosfática até a produção de insumos agrícolas. A Bunge Fertilizantes S/A em seu complexo industrial de Araxá lava rochas na parte NW do Complexo Alcalino-Carbonatítico do Barreiro, distante 340km a oeste de Belo Horizonte, capital do estado de Minas Gerais (Figura 23) com acesso pela rodovia BR-262 ou BR-146.

Figura 23 - Mapa de acesso ao município de Araxá, MG, Bunge Fertilizantes S/A. (fonte: modificado de DER/MG, 2005)

O complexo alcalino-carbonatítico do Barreiro situa-se a aproximadamente 7km ao sul do município de Araxá, como intrusão de forma semicircular, com 4,5km de diâmetro e constitui, juntamente com os complexos de Catalão I e II, Salitre I e II, Tapira e Serra Negra, um grupo de complexos de rochas intrusivas alcalinas carbonatíticas com idade aproximada de 80M.A. (Figura 24), pertencentes à Província Magmática do Alto Paranaíba, posicionados nos metassedimentos da faixa móvel Brasília. O complexo do Barreiro é formado por flogopititos cortados por “necks”, “plugs” e veios carbonatíticos, veios e diques de apatitito, nelsonito e magnetitito, e veios tardios de barita e silexito. O pirocloro e a apatita são os principais minerais de interesse econômico (Torres, 1996).

Figura 24 - Mapa Geológico da região de Araxá, MG. (fonte: modificado de Seer, 1999).

O perfil geológico da jazida, resultante da ação do intemperismo, consiste em três zonas de alteração discriminadas a seguir:

1) Capeamento estéril - Praticamente não possui fosfato apatítico. A cobertura superficial, com uma espessura máxima de 20m e cor avermelhada escura, é constituída de óxidos hidratados de ferro e argilominerais (CETEM, 2001).

2) Estéril - Espessuras locais de até 60m e cor marrom-amarelada, predominam óxidos hidratados de ferro, quartzo, argilominerais, magnetita, hematita, brookita, anatásio, barita, pandaíta e fosfatos secundários, como a gorceixita.

3) Zona portadora de apatita – Pode ser subdividida em três tipos de minérios (Tabela 8).

Tabela 8 – Composições mineralógicas médias (%) dos diferentes tipos de minério da mina de Araxá, MG, da Bunge Fertilizantes S/A

Minerais	Minério Oxidado	Minério Micáceo	Minério Carbonático
Apatita	32,5	24,3	26,6
Barita	7,1	0,2	2,3
Carbonatos	2,9	3,0	18,7
Óxido de Ferro	27,4	21,5	15,6
Micas	10,0	37,3	26,2
Outros	20,1	13,7	10,6

(fonte: CETEM, 2001)

Os três tipos de minérios da zona portadora de apatita apresentam as seguintes características:

- Minério oxidado - corresponde à tipologia atualmente em lavra, contendo elevado teor de apatita e óxidos de ferro, e baixo teor de carbonatos; pode ainda ser classificado em dois subtipos: argiloso e cimentado; o minério mais argiloso é friável e possui teores de P_2O_5 apatítico em torno de 10%, o minério cimentado é mais coeso, possui teores de P_2O_5 apatítico acima de 15% e é freqüentemente recortado por veios de barita;
- Minério micáceo – contém elevada porcentagem de minerais do grupo da mica (vermiculita, hidrobiotita e clorita);
- Minério carbonático – contém tanto calcita quanto dolomita.

Os dois últimos tipos de minérios não são lavrados atualmente (CETEM, 2001).

A produção anual da mina é de 4,0 milhões de toneladas de minério e 2,5 a 3,0 milhões de toneladas de estéril, com lavra sendo executada em bancadas de 10m de altura.

Como pode ser observado no fluxograma apresentado na Figura 25, o processo do beneficiamento da rocha fosfática é composto basicamente pelas operações de moagem, pré-classificação, classificação, separação magnética, deslamagem, condicionamento, remoagem e flotações da barita e apatita (materiais fino, grosso e remoído). No processo do beneficiamento são gerados basicamente

três tipos de rejeitos, os magnéticos (denominados, às vezes, apenas como magnetita), as lamas e os rejeitos de flotação (Bittar, 2006).

Figura 25 - Fluxograma do processo de beneficiamento de rocha fosfática, Araxá, MG. (fonte: CETEM, 2001)

Bittar (2006) que estudou a estabilidade desta barragem de rejeitos serve de base às informações aqui apresentadas. Seus dados foram obtidos a partir de diversos relatórios técnicos e projetos desenvolvidos na área desde a década de 70.

A barragem denominada B5, foco de estudo deste trabalho, recebe os rejeitos de flotação também denominados de rejeitos remoídos, pois são gerados na etapa conhecida como flotação do remoído (Bittar, op. cit.). Estes rejeitos são constituídos por materiais de granulometria na faixa areia fina/silte, não plásticos, tornando-os interessantes como materiais da construção das barragens. Entretanto, com o intuito

de agregar características de engenharia a estes rejeitos, torna-se necessário que os mesmos sejam ciclonados. Assim, depois de gerados na usina, estes rejeitos são conduzidos por meio de tubulações até o corpo da barragem de disposição final, sendo, então, ciclonados e subdivididos em dois materiais distintos: uma parcela mais grossa e mais permeável denominada “*underflow*”, utilizada como material de construção do aterro da barragem e uma parcela de granulometria mais fina e, conseqüentemente, menos permeável, denominada “*overflow*”, que é lançada a montante e passa a constituir a praia de rejeitos.

A barragem B5 vem sendo alteada sobre um dique de partida constituído de solo coluvionar argiloso e solo argiloso com pedregulhos que se ergue até a cota 915m, atingindo em seu ponto máximo 20 metros de altura. Os sucessivos alteamentos ocorrem pelo método de linha de centro, com ciclonagem de rejeitos na crista da barragem, seguindo o sucesso obtido com tal método aplicado nas barragens mais antigas denominadas B1 e B4.

Entretanto, no caso dos projetos iniciais (barragens B1 e B4), a ciclonagem dos rejeitos era realizada apenas nas zonas das ombreiras das barragens, uma vez que os rejeitos apresentavam características relativamente desfavoráveis à execução de barragens, particularmente em termos de permeabilidade (Busch, 1987). Posteriormente, com a caracterização do “*underflow*” como um material mais permeável e de boa drenabilidade (coeficiente de permeabilidade entre 1,0 e 4,0 x 10⁻³ cm/s), mesmo em períodos chuvosos, adotou-se a ciclonagem ao longo de toda a crista da barragem, diminuindo os custos envolvidos no transporte do rejeito por caminhões. Em termos de resistência, os rejeitos indicavam ângulos de atrito na faixa de 33 a 35°, para baixos graus de compactação e entre 37 a 40°, para compactações mais severas, com 90 a 95 % de grau de compactação. O aterro apresenta-se com boa compactação (tipicamente com valores entre 85 e 95%), decorrentes do espalhamento dos rejeitos por trator de esteiras.

A praia de rejeitos da B5 é formada pela deposição de uma polpa com 7 % de sólidos da fração fina (“*overflow*”) da ciclonagem. Isto faz com que se estabeleçam permeabilidades diferenciadas em relação à zona de jusante, em pelo menos uma ordem de grandeza. A estimativa da vazão de polpa lançada na barragem é de 2.600m³/h.

Entretanto, em algumas ocasiões, verifica-se que existe dificuldade na disposição de quantidades suficientes de material para garantir uma largura de praia

adequada, normalmente da ordem de 90m. Tal fato vem sendo contornado com descargas periódicas de rejeitos sem ciclonagem, em certos períodos do dia. O sistema de bombeamento é desligado e o rejeito passa a ser conduzido até a ombreira esquerda, de onde é lançado em ponto único ou, eventualmente, espigotado (lançado por meio de “*spigots*”) apenas por gravidade. Destaca-se que este procedimento pode motivar a criação de zonas ou estratos mais permeáveis intercalados com outros de menor permeabilidade e, conseqüentemente, zonas preferenciais de fluxo.

Atualmente, a barragem B5 já incorporou três dos cinco alteamentos previstos (cotas 910, 920, 930, 940 e 950m). O alteamento mais recente aconteceu na cota 930m, estando a crista atual da barragem próxima a cota 945m. Sua configuração atual pode ser observada na Figura 26.

Figura 26 – Foto aérea da barragem de rejeitos B5, Bunge Fertilizantes S/A. Araxá, MG. (fonte: modificado de Google Earth, 2006)

Com relação ao programa de instrumentação, a barragem conta com 11 indicadores de nível de água, 4 piezômetros do tipo Casagrande, 1 medidor de vazão e 2 réguas de medida de nível de água, constituindo 4 seções transversais ao corpo do barramento, a fim de avaliar as condições de drenagem da barragem.

4.1.2. Mariana – Barragem Doutor/ Circuito Timbopeba – CVRD

A Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), dentro do denominado Sistema Sul, possui quatro complexos mineradores: Itabira, Mariana, Minas Centrais e Minas do Oeste, que englobam mais de 15 minas, localizadas no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais. Neste contexto as Minas de Timbopeba e Alegria compõem o Complexo Mariana.

O município de Mariana situa-se na porção sudeste do Quadrilátero Ferrífero, distando cerca de 100 km da capital do estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, e 12km de Ouro Preto (Figura 27). O principal acesso a partir da capital é feito pela Rodovia dos Inconfidentes (BR-356) passando por Ouro Preto (MG-129) ou pela rodovia do Contorno (MG-262).

As duas Minas estão localizadas próximas à divisa dos municípios de Mariana e Ouro Preto, quadrante SE do Quadrilátero Ferrífero, distante cerca de 10 e 15 km, respectivamente, do município de Mariana, na direção Norte (Figura 28). Como pode ser observado na Figura 28 as Minas de Timbopeba e Alegria estão dentro dos mesmos domínios geológicos regionais. Assim, os dados gerais da geologia e mineralogia associadas a estes locais serão descritos em conjunto, sendo respeitadas as características individuais de processos e construção das barragens nos respectivos capítulos.

A geologia da região no extremo leste do Quadrilátero Ferrífero, sul da Serra do Caraça, é basicamente representada pelas rochas do Supergupo Minas, Grupos Caraça e Itabira. Localmente destaca-se a Formação Cauê do Grupo Itabira, com a predominância de itabiritos diversos. Oliveira Jr. (2006) descreve na Mina de Alegria que estas rochas distribuem-se por toda mina compondo a principal unidade

aflorante com algumas lentes de “hematitos” que se intercalam aos itabiritos e se distribuem, principalmente, na zona de charneira do sinclinal.

Figura 27 - Mapa de acesso ao município de Mariana, MG, Complexo Mariana – CVRD. (fonte: modificado de DER/MG, 2005)

Os itabiritos da região apresentam teores em torno de 30 a 50% de Fe, caracterizam-se por apresentarem forte bandejamento composicional, geralmente contínuos, com bandas de quartzo que chegam a apresentar 1 a 2 cm de espessura, podendo, eventualmente, chegar a 10 cm, e neste caso, caracterizando lentes de quartzito. As bandas claras são predominantemente constituídas de quartzo com granulação fina a média com trama sacaróide (granoblástica), muitas vezes os cristais de quartzo apresentam-se revestidos por uma fina película de hidróxido de ferro, configurando-lhes uma tonalidade levemente amarelada.

Figura 28 - Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero com suas principais minas e estruturas tectônicas (fonte: modificado de Baars & Rosière, 1994 apud Oliveira Jr., 2006).

Especificamente na Mina de Alegria são predominantes agregados de cristais de hematitas recristalizadas e intercrescidas com agregados de cristais de martitas. Goethitas também ocorrem, e por vezes chegam a ser a principal fase mineral, caracterizando localmente um itabirito goethítico, e na porção sul do flanco norte da Mina de Alegria itabiritos anfíbolíticos, compostos por anfíbolos, quartzo, goethita, martita, magnetita, especularita, limonita e caulinita.

Os estudos de Costa Lima (2001) revelam para os taludes da Mina de Timbopéba hematita, itabiritos, itabiritos anfíbolíticos, itabiritos anfíbolítico-carbonáticos e itabiritos silicosos. Com ocorrência local apresentam-se quartzitos bem estratificados de coloração creme da Formação Moeda e pelos filitos crenulados de coloração cinza prateada pertencentes à Formação Batatal.

O processo do beneficiamento do itabirito no circuito Timbopéba é composto pelas operações de britagem primária, secundária e terciária (mandíbula, cônico, cônico), pré-classificação, classificação, separação, flotação, deslamagem e filtragem. Ao longo do processo de beneficiamento são gerados rejeitos após a flotação.

A construção da barragem de rejeitos segue projeto elaborado pela Geoconsultoria (1998a) de onde foram extraídas as informações aqui apresentadas. A barragem possui dique inicial composto por maciço de terra compactada, a partir do qual é alteada a barragem com rejeitos ciclados. A sua localização no vale foi definida de tal forma a conciliar a busca de um eixo que resultasse em um menor volume de aterro, permitindo altear a barragem com eixo levemente deslocado para montante, evitando assim que o pé de jusante atingisse aluviões inconsistentes da várzea do córrego presente no vale. A sua configuração atual pode ser observada na Figura 29.

As características específicas do projeto condicionaram um dique inicial com cota de crista 770m, sendo altura máxima de 25m acima do fundo do vale atual, e comprimento de crista de 320m. O maciço de terra compactada, com seção homogênea, mostra:

- talude de montante - 1V:1,8H
- talude de jusante - 1V:2,2H
- largura da crista - 8m
- cota da crista - 770m
- altura máxima sobre o vale atual - 25m

- comprimento da crista - 320m

Figura 29 – Foto aérea da barragem de rejeitos de Doutor, CVRD S/A, Mariana. (fonte: modificado de Google Earth, 2006)

Durante o projeto foram avaliadas quatro áreas de empréstimo de solo, das quais as amostras apresentaram uma diversidade muito grande de características granulométricas, com ocorrência local, em alguns casos, de pedregulhos. Entretanto, a maioria das amostras se enquadra na categoria de argilas e siltes arenosos que foram analisados tecnicamente e utilizados na construção do dique inicial.

Na etapa de alteamento foi determinado o método de linha de centro, levemente deslocado para montante. Foram realizados diversos testes de ciclonagem pela CVRD com o intuito de prover amostras para os ensaios. Em cada teste coletou-se amostra da parte sólida da polpa de alimentação, do “overflow” e do “underflow” da ciclonagem, considerando-se que o “overflow” deveria situar-se na parte a montante da barragem, formando praia, e o “underflow” formaria o maciço de jusante, que é a zona mais importante do ponto de vista estrutural.

Ainda durante o projeto foram executados ensaios de granulometria e densidade dos sólidos sobre todas as amostras consideradas representativas,

encaminhadas ao laboratório. As densidades situaram-se, em geral, entre 2,9 e 3,2 g/cm³ e os ensaios de granulometria apresentaram resultados esperados, ou seja, tendência geral de “*underflow*” mais grosso e “*overflow*” mais fino.

A seqüência de alteamento da barragem obedeceu à curva cota x volume do reservatório, ao volume de “*underflow*” requerido para o maciço e à razão de alteamento, como pode ser resumida a seguir:

- talude médio - 1V:3H
- talude individual - 1V:2,7H
- largura da berma individual - 3m
- altura de cada bancada - 10m
- incremento do alteamento - 5m
- altura máxima final - 85m
- comprimento final da crista - 1.500m
- volume total - $3 \times 10^6 \text{m}^3$
- largura mínima da praia - 100m

Para os estudos de estabilidade da barragem foram feitos ensaios de compressão triaxial em corpos de prova saturados por contrapressão (adensados rápidos com medida de pressão neutra e com deformações controladas), e devido a algumas características do material frente a estes ensaios, foi realizado também ensaio de cisalhamento direto lento; considerando-se que a envoltória passe pela origem (ou seja, $c' = 0$), resultando em um ângulo de atrito $\phi' = 36,5^\circ$.

A praia de rejeitos da barragem de Doutor é formada pela deposição de uma polpa ciclona com relação de água/sólido lançada na barragem com aproximadamente 49% de sólidos, densidade da polpa 1,52. A estimativa da vazão lançada na barragem é de 345m³/h.

Em termos de instrumentação foram especificados para a porção do maciço de terra e rejeitos: indicadores de nível de água e piezômetros abertos do tipo Casagrande, além de pinos de controle de recalque e células de medida de pressão total para a região da galeria de extravasamento.

4.1.3. Mariana – Barragem Campo Grande/ Circuito Alegria – CVRD

De acordo com o apresentado no capítulo “4.1.2 Mariana – Barragem Doutor / Circuito Timbopeba”, a Mina de Alegria está ao norte das cidades de Mariana e Ouro Preto, situada no extremo leste do Quadrilátero Ferrífero, e ao sul da Serra do Caraça (Figura 28). Está alojada na Formação Cauê do Grupo Itabira, ao longo de uma estrutura sinformal, conhecida como “Sinclinal de Alegria” (Figura 28).

Devido às semelhanças geológicas entre as minas, os dados geológicos e mineralógicos regionais podem ser observados no capítulo “4.1.2 Mariana – Barragem Doutor / Circuito Timbopeba – CVRD”. A Tabela 9 apresenta o perfil mineralógico específico para a Mina de Alegria.

Tabela 9 – Composições mineralógicas médias (%) do minério lavrado na Mina de Alegria - Mariana, MG, da CVRD.

Minerais	Composição (%)
Hematita especular	15,0
Hematita	38,0
Magnetita	1,0
Goethita	19,8
Limonita	2,2
Quartzo	24,0

(fonte: CETEM, 2001)

O fluxograma apresentado na Figura 30 ilustra o processo de beneficiamento do itabirito, composto basicamente pelas operações de britagem primária, secundária e terciária (mandíbula, cônico, rolo liso), classificação, separação, deslamagem, flotação e espessamento. Ao longo do processo de beneficiamento são gerados rejeitos basicamente após a flotação.

Assim como a barragem de Doutor, a construção da barragem de rejeitos do córrego Campo Grande segue projeto elaborado pela Geoconsultoria (1998b), de onde foram extraídas as informações aqui apresentadas.

Figura 30 – Fluxograma do processo de beneficiamento da Mina de Alegria, CVRD. (fonte: CVRD, 2006)

De acordo com o apresentado pela Geoconsultoria (1998b), na data de execução do projeto já existia uma barragem de terra compactada construída até a cota 928,67m, tendo no reservatório lama do beneficiamento mineral.

Deste modo o projeto de alteamento da barragem do Campo Grande foi concebido com base em algumas premissas, na qual se destaca o alteamento a partir da barragem pré-existente, funcionando como dique inicial, com rejeitos ciclizados das Instalações de Beneficiamento (IB's) II e III, dispondo-se o “underflow” sobre o dique e a jusante deste (método da linha de centro), e lançando-se o “overflow” para montante, formando a praia. O sistema conta ainda com o lançamento periódico dos rejeitos totais da IB III hidraulicamente para montante. A configuração geral da barragem pode ser observada na Figura 31.

O alteamento previsto é executado em etapas, prevendo-se o limite final na cota 990m, ou seja, altura máxima, acima da cota do vale, de cerca de 90m. Para isto foram previstos alteamentos, para facilidade operacional, alteamentos executados a cada 2,5m ou então a cada 5m. Na etapa final de construção os taludes deverão sofrer processos de readequação geométrica, de forma a compor bermas a cada 10m de altura.

Figura 31 – Foto aérea da barragem de rejeitos de Campo Grande, CVRD S/A, Mariana. (fonte: modificado de Google Earth, 2006)

A praia de rejeitos da barragem Campo Grande é formada pela deposição de polpa ciclizada dos rejeitos da IB III, com aproximadamente 36% sólidos, densidade da polpa 1,35. A estimativa da vazão lançada na barragem é de $600\text{m}^3/\text{h}$

O programa de monitoramento previsto para acompanhar o nível d'água no interior do maciço e a medida de vazões de água na saída da drenagem de fundação é composto por 13 indicadores de nível d'água e, na saída do enrocamento de pé da barragem alteada, por medidor de vazão triangular, possuindo ainda régua graduada no reservatório. As águas do reservatório (lagoa de decantação) são retiradas por sistema extravasor por meio de um flutuante (balsa) com sistema de bombeamento de água.

4.2. Amostragem

Seguindo o planejamento enumerado no item “4. Materiais e Métodos” e de acordo com os objetivos e as justificativas desta pesquisa, desenvolveu-se um

procedimento de amostragem dos materiais depositados, ao longo das praias de rejeitos.

A determinação dos pontos de amostragem baseia-se na forma típica de deposição que se desenvolve a partir do ponto de lançamento, na qual o material se distribui radialmente com perda de energia à medida que se afasta do ponto inicial de descarga, usualmente na forma de “*spigots*”, em direção a lâmina d’água, ou bacia de decantação.

Assim foi elaborada uma malha de amostragem básica, na qual os pontos seguiram o seguinte esquema (Figura 32):

Figura 32 – Esquema da distribuição dos pontos de amostragem nas praias de rejeitos.

Devido à característica de alta saturação das praias de rejeitos, a malha de amostragem idealizada foi adaptada à realidade de cada local, na medida em que o acesso é possível somente até alguns locais sem que ocasionasse afundamento/atolamento do técnico de amostragem. A Tabela 10 resume o local, letra de identificação e distâncias reais em metros, obtidas de cada ponto ao longo das praias de rejeitos.

Esta malha resultou na coleta de amostras situadas a: 0m, 5m, 10m, 10m lado direito (LD), 10m lado esquerdo (LE), 20m, 20m lado direito (LD), 20m lado esquerdo (LE), 40m e 80m do ponto de lançamento.

Como resultado tem-se, a título de exemplo, a amostra B-0m, referente ao ponto de amostragem situado a 0m do ponto de lançamento na praia da barragem B5, pertencente à Bunge; D-5m, referente ao ponto de amostragem situado a 5m do ponto de lançamento na praia da barragem de Doutor e, amostra G-40m situada a 40m do ponto de lançamento na praia de rejeitos da barragem de Campo Grande. As praias de rejeitos estudadas podem ser visualizadas nas Figuras 33 a 39.

Tabela 10 – Identificação das amostras coletadas ao longo das praias.

Barragem	Identificação	Amostras (m)
B5 – Bunge (Araxá, MG)	B	0, 5, 10, 10LD, 10LE, 20, 20LD, 20LE, 40
Doutor – CVRD (Mariana, MG)	D	0, 5, 10, 10LD, 10LE, 20, 20LD, 20LE, 40, 80
Campo Grande – CVRD (Mariana, MG)	G	0, 5, 10, 10LD, 10LE, 20, 20LD, 20LE, 40, 60

Em cada ponto de amostragem foi cravada manualmente uma cavadeira, retirando-se cerca de 30cm de espessura e 40cm de diâmetro do depósito. Nestes locais foram coletadas as amostras em quantidade adequada para a realização dos estudos da presente pesquisa e tomando como referência as normas ABNT (1986) *NBR-6457 Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização* e ABNT (2001a) *NBR-NM26 - Agregados - Amostragem*, constituindo assim massas totais em cada ponto não inferiores a 40kg acondicionadas em sacos plásticos protegidos duplamente para evitar qualquer perda de material.

As amostras para ensaios de simulação foram coletadas no ponto imediatamente após o lançamento, isto por que nem todos os pontos de lançamento estavam em operação na oportunidade da visita, constituindo massa total individual superior a 300kg.

Figura 33 – Vista geral a partir do ponto de lançamento da praia de rejeitos da barragem B5, Bunge, situada em Araxá, MG.

Figura 34 – Vista geral da barragem B5, Bunge, mostrando à esquerda da foto, montante, a praia de rejeitos e a lagoa de decantação.

Figura 35 – Vista geral a partir do ponto de lançamento da praia de rejeitos da barragem de Doutor, CVRD S/A, situada em Mariana, MG.

Figura 36 – Vista geral do lançamento por “spigots” fixos na praia de rejeitos da barragem de Doutor, CVRD S/A, situada em Mariana, MG.

Figura 37 – Vista geral do eixo da barragem de Doutor, CVRD S/A, mostrando à montante, lado esquerdo da foto, praia de rejeitos.

Figura 38 – Vista geral do lançamento por “spigots” fixos na praia de rejeitos da barragem de Campo Grande, CVRD S/A, situada em Mariana, MG

Figura 39 – Vista geral a partir do ponto de lançamento da praia de rejeitos da barragem de Campo Grande, CVRD S/A, situada em Mariana, MG.

4.3. Ensaios laboratoriais

Após a etapa de amostragem os materiais coletados foram preparados para análises laboratoriais, onde passaram por processos de preparação, envolvendo secagem, homogeneização e separação de alíquotas para posteriormente serem analisadas e ensaiadas como ilustrado na Figura 40.

Figura 40 – Fluxograma do processo de análise dos sedimentos obtidos nas praias de rejeitos de mineração.

A caracterização completa dos materiais exigiu uma série de determinações laboratoriais, as quais serão apresentadas e discutidas nos capítulos subseqüentes com indicação dos laboratórios onde tais atividades foram realizadas.

4.3.1. Preparação das amostras

Todas as amostras coletadas foram secas em estufa no Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Após secagem foram armazenadas em sacos plásticos e posteriormente homogeneizadas. O método adotado para homogeneização foi o da pilha alongada (Figura 41), indicado para homogeneização de grandes volumes e com características de material arenoso e granular.

Figura 41. Seqüência esquemática de homogeneização por pilhas alongadas. (fonte: Kahn, 2003)

Para isto foi feita uma pilha de aproximadamente 2m de comprimento em superfície limpa, aspirada e seca. A areia foi continuamente vertida, em movimento retilíneo, no sentido de vaivém, resultando em uma pilha alongada de seção transversal triangular (Figura 42). Este formato e método, teoricamente, asseguram que em qualquer porção da pilha o sedimento deve estar igualmente distribuído em relação à sua granulometria.

Depois de pronta, as extremidades da pilha foram retomadas e novamente distribuídas sobre a mesma. Este procedimento é necessário, pois as extremidades representam as porções menos homogêneas (Figura 43).

Ao fim deste procedimento, foram retiradas alíquotas que seguiram para a fase de quarteamento em quarteador tipo Jones, seguindo procedimento da norma ABNT (2001b) *NBR-NM27 - Agregados - Redução da amostra de campo para*

ensaios de laboratório, a fim de reduzir a massa de material para os ensaios que requerem menor volume de amostra.

Figura 42 – Vista da pilha alongada de seção transversal triangular.

Figura 43 – Vista da pilha alongada de seção transversal triangular com extremidade irregular e não homogênea.

4.3.2. Caracterização Química e Mineralógica

As características químicas e mineralógicas dos rejeitos de mineração estão diretamente relacionadas ao tipo de minério explorado e ao processo de beneficiamento industrial, incluindo-se as influências relativas às alterações das frentes de lavra e por produtos químicos do beneficiamento.

Assim os diferentes materiais obtidos ao longo das praias de rejeitos foram submetidos a ensaios de difração de Raios-X pelo método do pó, utilizando-se equipamento da marca Philips, modelo X'Celerator, acompanhados por análise química em espectrômetro seqüencial de fluorescência de Raios-X por energia dispersiva, realizadas em equipamento Philips, modelo Axios, e interpretação dos dados em software X'Pert HighScore Plus ver. 2.1.1, visando a determinação dos constituintes minerais presentes. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Adicionalmente, foram realizadas análises microscópicas dos rejeitos por microscopia eletrônica de varredura (MEV) neste mesmo laboratório. As amostras foram previamente colocadas sobre suporte metálico, tradicionalmente denominados de "*stubs*", com cerca de 25mm de diâmetro. Para que o processo de deposição dos grãos ocorra de maneira uniforme e com o mínimo de tendência possível na geometria de deposição das partículas, a amostra e o suporte preparado com fita adesiva dupla-face de carbono são colocados dentro de um recipiente hermeticamente fechado (Figura 44). Neste recipiente é injetado ar comprimido a fim de se promover a formação de uma "nuvem" homogênea de partículas fazendo com que os grãos da amostra depositem-se aleatoriamente sobre a superfície adesiva conforme pode ser observado na Figura 45.

As amostras são então cobertas por um fino filme de carbono por meio da evaporação de fio de carbono permitindo a perfeita coleta de imagens e microanálises sob microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo Stereoscan 440, marca Leo, e espectrômetro de Raios-X por dispersão de energia (Energy Dispersion Spectrometer - EDS), marca Oxford (Inca), com detector de germânio (Ge).

Figura 44 – Visão geral do recipiente hermeticamente fechado com amostra e suporte.

Figura 45 – Suporte metálico ("stub") com grãos da amostra sobre a superfície adesiva de carbono (preta).

4.3.3. Análise Granulométrica

A análise granulométrica visa determinar a relação entre as dimensões das partículas e os seus percentuais, bem como a graduação destas no solo. Isto é feito por meio da análise da curva de granulometria, onde é possível observar diferentes composições como apresentado na Figura 46.

Figura 46 – Diferentes graduações do sedimento observadas por meio da análise granulométrica, a) bem graduada; b) desuniformes, c) uniformes. (fonte: modificado de Almeida, 2005)

Como os grãos dos rejeitos de mineração não são materiais formados por processos naturais, sendo sua origem associada a processos físicos de britagem e ciclonagem ou a processos químicos (de flotação), as análises granulométricas convencionais, baseadas na lei de Stokes, podem induzir a erros cumulativos em função do formato não esférico dos grãos ou de certa proporção com uma composição química de elevados teores de ferro e, portanto, elevada densidade dos grãos.

Entretanto, nos ensaios convencionais segundo a norma ABNT (1984a) *NBR-7181 – Solo - Análise Granulométrica*, são apresentados dois procedimentos distintos: peneiramento para partículas com dimensões entre 2,0mm (10#) e 0,075mm (200#) e sedimentação para as partículas com dimensões menores que 2 μ m.

Devido às características destacadas, neste trabalho são apresentadas as análises granulométricas utilizando-se o granulômetro a laser, peneiramento a úmido e análise de imagens. Esta abordagem permite a comparação dos dados entre as diferentes técnicas utilizadas, uma vez que em função do método empregado, com diferentes princípios físicos, um valor numérico que representa o diâmetro das partículas é gerado.

A esfera é a única forma que pode ser descrita por um número, expresso pelo seu diâmetro (d). Grãos ou partículas com formatos irregulares precisam ser quantificadas utilizando-se mais de uma medida. Qualquer partícula de forma diferente de uma esfera pode ter o seu volume, peso ou outra propriedade expressos por um valor de uma esfera equivalente, ou diâmetro equivalente, como demonstrado na Figura 47.

Figura 47 – Diferentes diâmetros de esferas equivalentes gerados a partir de um grão irregular (fonte: modificado de Rawle, 2002 apud Papini, 2003)

Para a realização dos ensaios de granulometria a laser foi utilizado o equipamento Malvern Mastersizer S Long Bed Ver.2.19. da Malvern Instruments Ltd. mediante a técnica de espalhamento de luz laser de baixo ângulo no Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

A preparação das amostras consistiu na homogeneização em saco plástico com intensa agitação para que o chamado efeito saleiro (arranjo dos grãos provocado pelo choque entre eles dentro do saco onde estavam armazenados) fosse eliminado com posterior inserção de cerca de 2g no compartimento específico do granulômetro a laser.

O equipamento permite a realização do ensaio por meio de duas metodologias distintas: sem ultra-som, que é equivalente à sedimentação sem defloculante e com ultra-som, técnica considerada equivalente ao ensaio de sedimentação com defloculante. Como os rejeitos analisados são tipicamente arenosos, oriundos de processo de britagem, adotou-se a metodologia do ensaio sem ultra-som, mas com uso de dispersante químico em solução com água, Calgon_{10%} (Hexametáfosfato de sódio), a fim de evitar eventuais processos de floculação na fração fina.

Do volume homogeneizado em pilhas alongadas, foi separada alíquota de peso mínimo 1kg de cada rejeito, para realização da análise granulométrica por peneiramento a úmido em duplicata, visando confirmação dos resultados.

A série de peneiras adotada para esta análise granulométrica baseou-se primeiramente na norma ABNT (1984a) *NBR-7181 – Solo - Análise Granulométrica*, prevê apenas as peneiras de aberturas 2,0; 0,25 e 0,075mm. Entretanto, observando-se a característica da amostra e com o intuito de que as frações mais finas sejam melhor estudadas foram utilizadas 6 peneiras de forma a se obter dados contínuos da curva granulométrica. Esta análise resultou na seguinte série de peneiras: 0,210mm (65#); 0,149mm (100#); 0,105mm (150#); 0,074mm (200#); 0,044mm (325#); 0,037mm (400#) e fundo.

A metodologia adotada na aquisição de imagens, ver capítulo “4. *Materiais e Métodos*”, permite a geração de dados relativos ao tamanho dos grãos projetados em uma superfície e este valor convertido para volume, pela expressão:

$$V = \pi * d_a^{3/6} \quad (6)$$

Onde V é o volume calculado, e d_a é o diâmetro equivalente de mesma área da superfície projetada.

Os resultados das análises granulométricas são apresentados em tabelas e gráficos. Para as análises realizadas em granulômetro a laser, o diâmetro equivalente da partícula em volume é expresso por d_v . Já o diâmetro da partícula retida em cada peneira na técnica de peneiramento a úmido é denominado d_s e ainda, o diâmetro equivalente resultante da superfície projetada obtida em análise de imagem é chamado de d_{av} .

Para auxiliar a identificação das características de uniformidade e graduação dos rejeitos foram definidos e avaliados ainda os seguintes índices obtidos diretamente dos gráficos: diâmetro efetivo, D_e , equivalente a 10% acumulado passante da amostra, designado como D_{10} , que serve para o cálculo da permeabilidade definido por Hazen (Mello & Teixeira, 1967) através da expressão:

$$K=100d_{10}^2 \quad (7)$$

Sendo D_{10} em centímetros determinado empiricamente com grãos de areia uniforme, cujo d_{10} variava entre 0,01 e 0,3cm.

E ainda, o grau de uniformidade ou como definido por Vargas (1978), grau de desuniformidade ou não uniformidade, pois indica a falta de uniformidade do material, sendo tanto menor quanto mais uniforme for o solo (CU);

$$CU = D_{60} / D_{10}$$

Onde se tem tradicionalmente a seguinte classificação:

$CU < 5$ - muito uniforme

$5 < CU < 15$ - uniformidade média

$CU > 15$ - desuniforme

E ainda o coeficiente de curvatura (CC):

$$CC = (D_{30})^2 / (D_{10} * D_{60})$$

Considerando que materiais bem graduados têm $1 < CC < 3$.

4.3.4. Densidade real dos grãos

O peso específico (γ_g) de uma partícula sólida é, por definição, o peso da substância que a forma, por unidade do volume que ocupa no espaço. O peso específico da partícula é determinado pela razão entre seu peso (seco) e seu volume.

$$\gamma_g = P_s / V_s$$

Densidade (δ) ou densidade relativa de uma partícula é a razão entre seu peso específico e o peso específico da água (γ_a) destilada e isenta de ar à 4° C. Como este último vale 1,000 g/cm³, a densidade e o peso específico são expressos pelo mesmo valor numérico.

$$\delta = \gamma_g / \gamma_a = \rho_g / \rho_a$$

Com base nestas definições clássicas, conclui-se que os índices peso específico e densidade dos grãos são valores aproximados, onde o peso varia conforme o local onde são determinados, principalmente quanto à altitude, e o volume conforme a temperatura e a pressão a que estiverem submetidos. Para aplicações normais da Mecânica dos Solos, tais variações são muito pequenas, podendo ser desprezadas.

Como em um solo podem ocorrer partículas de naturezas variadas, em geral há mais interesse em determinar o peso específico médio das partículas sólidas que o compõem. Além disso, a fração mais fina dos solos naturais costuma ter natureza diversa daquela de maior tamanho, pois é gerada mais por desintegração química (oxidação, hidratação, carbonatação) que mecânica (ruptura e abrasão causados por temperatura, atrito, etc.). Por isso, as normas sempre se referem à determinação do peso específico médio ou da densidade média das partículas menores que um tamanho especificado. Todas as normas exigem que o valor da densidade seja expresso com precisão de milésimos, portanto, com três casas decimais.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1984b) *NBR-6508 - Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm - Determinação da massa específica*, adota o processo do picnômetro para a determinação da massa específica das partículas menores que 4,8mm, enquanto o Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (DNIT), antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER, 1994), opta pela determinação da densidade das partículas menores que 2,0mm (*DNER-ME 093/94 - Solos - determinação da densidade real*).

A densidade dos grãos depende principalmente dos constituintes mineralógicos de um determinado tipo de solo. Para os solos mais comuns, a densidade dos grãos varia de 2,650 a 2,900; valores menores em solos com elevados teores de matéria orgânica e maiores nos que têm óxidos de ferro. A presença de minérios ou metais com densidade muito elevada, como o ferro, pode aumentar muito o valor de δ .

Para os rejeitos em estudo, os ensaios para a determinação da densidade dos grãos (δ) foram executados com base nos procedimentos prescritos pelas normas DNER-ME 093/94, com a utilização do picnômetro de 50cm³, e considerando que a densidade à temperatura T é dada por:

$$\delta_T = (M_2 - M_1) / ((M_4 - M_1) - (M_3 - M_2))$$

Onde: δ_T = densidade real dos grãos à temperatura T; M_1 = massa do picnômetro vazio e seco, em g; M_2 = massa do picnômetro mais amostra, em g; M_3 = massa do picnômetro mais amostra, mais água, em g; M_4 = massa do picnômetro mais água, em g.

O valor da densidade real dos grãos deverá ser referido à água, à temperatura de 20°C, calculado por:

$$\delta_{20} = K_{20} \times \delta_T$$

Onde: δ_{20} = densidade real dos grãos à 20°C; δ_T = densidade real dos grãos à temperatura T e, K_{20} = razão entre a densidade relativa da água à temperatura T e a densidade relativa da água à 20°C;

No presente estudo os ensaios foram executados com álcool etílico absoluto (P.A.), portanto os valores de K_{20} foram ainda corrigidos pela variação da densidade do álcool etílico.

4.3.5. Limites de Liquidez e Plasticidade

Os limites de liquidez e plasticidade foram realizados no Laboratório de Caracterização do Núcleo de Cerâmica da Escola Senai Mario Amato - SENAI/SP.

Os solos grossos, arenosos, têm comportamento previsível por suas curvas granulométricas. Entretanto a experiência mostra que isto não acontece nos solos finos. Vargas (1978) define solos finos como aqueles cuja maioria dos grãos tem diâmetro inferior a 0,1mm.

Portanto, a plasticidade está associada aos solos finos e depende do argilomineral que deu origem à argila presente nesses solos. Como a forma dos grãos depende da estrutura cristalina, e como essa é peculiar a cada espécie mineral, conclui-se que cada espécie de mineral argila, dará à argila plasticidade diferente. Tal propriedade depende principalmente do teor de umidade da argila. Para se notar a plasticidade, este teor de umidade deve ser tal que permita a

lubrificação entre as partículas, possibilitando o deslizamento de umas sobre as outras.

A propriedade dos solos em suportar cargas e conservar sua estabilidade, depende da resistência ao cisalhamento do solo; toda massa de solo se rompe quando esta resistência é excedida. Nos casos em que a umidade de um solo coesivo é muito elevada, a ponto de este solo se apresentar como um fluido denso, diz-se que o solo encontra-se no estado líquido, e praticamente não apresenta resistência ao cisalhamento.

À medida que perde água, o solo (coesivo) endurece (ou fica mais viscoso). A partir de determinado teor de umidade $h_1 = LL$ (Limite de Liquidez), o solo perde sua capacidade de fluir, porém pode ser moldado facilmente e conservar sua forma. Assim, o solo permanece no estado plástico (Figura 48).

Com a continuação da perda de umidade, a capacidade de ser moldado diminui, até que a partir do teor de umidade $h_2 = LP$ (Limite de Plasticidade), uma amostra se fratura ao se tentar moldá-la. Este é o chamado estado semi-sólido, no qual o solo tem aparência sólida, mas sofre reduções de volume enquanto continua a secar.

Continuando a secagem, ocorre a passagem gradual para o estado sólido, onde praticamente não mais ocorre variação do volume devida à perda de umidade. O limite entre esses dois últimos estados é o teor de umidade $h_3 = LC$ (Limite de Contração).

Figura 48 - Esquema mostrando as relações entre os diferentes estados de um solo argiloso e os limites de consistência. (fonte: modificado de Fiori & Carmignami, 2001)

Em cada uma das regiões citadas o solo terá comportamento mecânico diferente, onde:

- Acima do LL ele se comportará como um líquido (viscoso) no qual a resistência ao cisalhamento é proporcional à velocidade de deformação. O coeficiente de proporcionalidade entre resistência ao cisalhamento e o gradiente da velocidade de deformação d_v/d_z é chamado viscosidade.

- Na zona plástica a resistência ao cisalhamento é proporcional à deformação até um determinado ponto; daí por diante ela é constante e independente da deformação.

- No estado semi-sólido há um ponto limite onde o solo se fratura, correspondente à propriedade de friabilidade perfeita.

Embora fundamentados em extensas investigações experimentais, as definições dos limites de consistência são convencionais. Ainda assim, permitem uma idéia bastante clara do tipo de solo e de suas propriedades físicas, constituindo-se em determinações rotineiras nos laboratórios de mecânica dos solos do mundo.

Casagrande padronizou o ensaio de Limite de Liquidez (LL) do processo de Atterberg, no qual corresponde ao teor de umidade de um solo quando são necessários 25 golpes no aparelho de Casagrande para fechar uma ranhura padrão, aberta na superfície da amostra.

O ensaio padronizado pela norma ABNT (1984c) *NBR-6459 Solo - Determinação do limite de liquidez*, requer que sejam obtidos diversos pontos para estabelecer, em um gráfico mono-logarítmico, a relação de umidade (percentagem) por número de golpes, obtendo-se uma linha reta por interpolação da qual é obtido o valor de 25 golpes. Recomenda-se a determinação de, no mínimo, seis pontos para a melhor definição da reta.

Caputo (1988) apresenta que, de acordo com estudos da Federal Highway Administration, o LL pode também ser determinado conhecendo-se um só ponto, por meio da seguinte fórmula:

$$LL = \frac{h}{1,419 - 0,3 \log n}$$

Nesta equação, h é a umidade em percentual e n é o número de golpes.

Segundo Fiori & Carmignami (2001), Atterberg convencionou que a condição para uma amostra de solo estar no estado plástico, Limite de Plasticidade (LP), é a possibilidade de com ela moldar um cilindro de 10cm de comprimento por 3mm de

diâmetro, por rolagem sobre uma placa de vidro conforme determinado em norma ABNT (1984d) *NBR-7180 Solo - Determinação do limite de plasticidade*.

4.3.6. Análise de forma

O tamanho e a forma de partículas refletem a composição mineralógica, condições de formação e de liberação da matriz rochosa, do tipo e tempo de transporte, e dos ambientes deposicionais. Os processos mecânicos e químicos que atuam nas partículas desde sua formação até sua deposição, determinam sua forma (Krumbein, 1941; Margolis & Krinsley, 1974; Mazzullo & Ritter, 1991). Assim, nos estudos de rochas e materiais sedimentares é comum a classificação granulométrica acompanhada de estudos da forma dos grãos.

A forma dos grãos pode ser descrita a partir de três parâmetros básicos: esfericidade, arredondamento e rugosidade.

A esfericidade refere-se à forma geral da partícula e reflete a similaridade entre o comprimento da partícula, a altura e a largura. A esfericidade pode ser determinada pela relação do diâmetro da maior esfera inscrita ($r_{\text{max-in}}$) com relação ao menor diâmetro da esfera circunscrita ($r_{\text{min-cir}}$) como demonstrado na Figura 49.

Uma das abordagens mais divulgadas foi aquela conhecida pela designação de "Classificação de Zingg", de 1935, concebida especialmente para sedimentos muito grossos como os seixos. (Dias, 2004). Nesta classificação de Zingg consideram-se os 3 diâmetros principais do elemento (**a** - eixo maior, **b** - eixo intermediário, e **c** – eixo menor) e determinam-se as razões:

$$p = c/b \quad q = b/a \quad (8)$$

Sobre as quais se distinguem quatro grupos: esferoidal, discoidal, lamelar e acicular como demonstrado na Figura 50.

Figura 49 – Determinação da forma dos grãos por esfericidade e arredondamento. (fonte: modificado de Krumbein & Sloss, 1963 apud Cho et al., 2006)

Figura 50 – Determinação da esfericidade por medida dos eixos. (fonte: modificado de Lees, 1964, Janoo, 1998 apud Uthus et al., 2005)

O arredondamento é descrito como o grau de abrasão de uma partícula demonstrado por quão agudas são suas bordas e cantos. É determinado pela razão do raio médio da curvatura de diversos pontos junto às bordas ou cantos da partícula ao raio da curvatura da esfera inscrita máxima (Figura 50). Tradicionalmente é utilizada a figura de referência de Powers (1953) para comparar e expressar descritivamente o grau de arredondamento (Figura 51) em: muito

anguloso, anguloso, sub-anguloso, sub-arredondado, arredondado, bem arredondado.

O grão chamado de muito anguloso/angular é aquele cujas bordas e os cantos são contundentes, tão afiados que poderiam cortar. Foi definido por Powers (1953) e é similar à classe anguloso de Pettijohn (1957) com valor de arredondamento de 0,10 a 0,15.

O grão anguloso possui bordas e cantos afiados, com quase nenhuma evidência da abrasão. O valor de arredondamento está situado em torno de 0,20.

Figura 51 – Determinação do arredondamento dos grãos (fonte: modificado de Powers, 1953)

Os grãos livres de bordas afiadas, mostrando sinais de pequena abrasão com bordas e cantos arredondados em algumas extensões, preservando a forma e faces lisas originais são denominados de sub-angulosos. O valor estimado de arredondamento é de 0,25-0,30.

A denominação de sub-arredondado é aplicada ao grão parcialmente arredondado, apresentando considerável, mas não completa abrasão, onde a forma original ainda é evidente, mas as bordas e cantos são arredondados e suaves, com arredondamento entre 0,30 e 0,40.

O grão arredondado possui as bordas redondas e os cantos originais alisados ou em processo de curvatura, cujas faces originais são removidas quase completamente pela abrasão. Algumas áreas lisas podem permanecer; o valor de arredondamento varia entre 0,40 e 0,60.

O termo bem arredondado é aplicado aos grãos cujas faces, bordas e cantos originais foram destruídos pela abrasão e a superfície inteira apresenta-se em

curvas largas sem nenhuma área plana. O valor de arredondamento destes grãos está normalmente acima de 0,80.

A rugosidade é caracterizada pelo aspecto textural superficial dos grãos. Pode ser descrito em termos de estriado, polido, intemperizado ou corroído, picotado, sujo.

A análise de imagem utiliza, em grande parte dos softwares, dois parâmetros fundamentais para relacionar a forma dos grãos: relação de aspecto e esfericidade. Assim, é possível relacionar estas duas variáveis com formas idealizadas como apresentado por Almeida-Prieto et al. (2004) (Tabela 11).

Tabela 11– Diferentes valores de relação de aspecto e esfericidade para formas idealizadas.

Forma		Relação de Aspecto	Esfericidade
círculo		1,00	0,97
quadrado		1,00	0,80
elipse		1,15	0,97
	1,51	0,92
retângulo		1,38	0,77
	1,96	0,71
quadrado arredondado		1,00	0,89
	1,00	0,95
retângulo arredondado		2,37	0,86
	1,39	0,92
	1,40	0,94
forma de alteres		1,42	0,84
	1,23	0,81
	1,44	0,72
	1,04	0,87

Modificado de Almeida-Prieto et al., 2004

Dentre as técnicas possíveis de se determinar tais parâmetros morfológicos, tradicionalmente é utilizada a análise de forma estática, conduzida sobre amostras que estão paradas sobre uma superfície, normalmente plana, tal como lâminas ou suportes (Figura 52). As vantagens deste método são: a profundidade de campo e precisão no contorno dos grãos para partículas muito pequenas. Este método pode ser executado seguindo metodologia e padronização da Organização Internacional para Padronização (International Organization for Standardization - ISO) ISO-13322-

1/04 - Particle size analysis -- Image analysis methods -- Part 1: Static image analysis methods (2004).

Figura 52 – Esquema de aquisição de imagens de modo estático. (fonte: modificado de Sympatec, 2007)

O inconveniente do procedimento de análise de imagem de modo estático é a baixa quantidade de dados tradicionalmente obtida, entre 50 e 1000 grãos, resultando em baixa confiabilidade estatística e, principalmente, na tendência da orientação das partículas. Este comportamento prejudica a análise de esfericidade, sendo passível ainda de se sobreporem no processo de deposição, resultando em muitas horas de processamento em software e/ou separação prévia em faixas granulométricas para posterior integração dos dados apesar dos avanços tecnológicos em automação.

Para análise qualitativa das características morfológicas dos grãos foi utilizada esta técnica utilizando microscópio eletrônico de varredura do Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Mesmo que a automatização da análise seja possível, esta técnica é limitada basicamente para distribuições granulométricas estreitas. Uma distribuição tão estreita requer que sejam medidas 6.000 partículas a fim de se obter um diâmetro médio com repetibilidade. (ISO, 2007 *apud* Sympatec, 2007)

Na outra técnica, análise de imagens de modo dinâmico, a imagem é obtida segundo a geometria apresentada na Figura 53. São utilizadas uma câmera e uma fonte de luz pulsante, capazes de captar dezenas de imagens por segundo (“frames per second” - fps), resultando um grande número de imagens em curto espaço de tempo.

Figura 53 – Esquema da estrutura necessária para obtenção de imagens de modo dinâmico. (fonte: modificado de Beckman Coulter, 2006)

O equipamento utilizado, RapidVUE (Figura 54), segue este princípio básico, no qual as partículas passam em frente à máquina fotográfica, a uma distância ideal do foco em que a imagem é obtida (Figura 55) e convertida em tamanho. Trata-se, portanto, de um analisador de forma e de tamanho entre os limites de 10 e 1.500 μm . O RapidVUE gera uma imagem em tons de cinza (0-256) e converte para a forma digital utilizando um algoritmo simples que identifica e mede as partículas de uma imagem dentro do limiar escolhido entre "0" e "256".

Figura 54 – Vista do equipamento RapidVUE da Beckman Coulter utilizado no estudo (a) e exposição em detalhe do módulo (b) para captação de imagens, transparente por onde os grãos circulam em água.

Figura 55 - Detalhe da passagem dos grãos no módulo para captação de imagens de modo dinâmico com a contínua circulação de água. (fonte: modificado de Beckman Coulter, 2006)

No procedimento adotado foram capturados 50 campos, ou seja, 50 imagens de cada amostra, contabilizando ao final pelo menos 10.000 grãos analisados por amostra.

Logo após a captura das imagens dos grãos de cada material utiliza-se software específico para a análise de imagens, baseando-se em uma imagem binária resultante daquela capturada inicialmente. Nesta, vários parâmetros podem ser determinados, tais como: diâmetro do círculo equivalente à área, menor diâmetro da esfera circunscrita à partícula, perímetro, relação de aspecto e esfericidade.

Na Figura 56 **Da** significa o diâmetro do círculo equivalente à área e refere-se ao diâmetro de um círculo teórico que tenha a mesma área da partícula medida. **Dp** significa o perímetro equivalente ao diâmetro do círculo, que se refere ao círculo que tem o mesmo perímetro da partícula medida. O **LBC** denota o menor diâmetro da esfera circunscrita à partícula.

Figura 56 - Representação esquemática dos parâmetros analisados em cada grão após captação de imagens do RapidVUE (fonte: modificado de Beckman Coulter, 2006)

Onde para qualquer forma $D_p \geq D_a$.

A esfericidade pode ser calculada linearmente pela expressão: D_a / D_p ou ainda, como tradicionalmente calculada nos métodos por análise de imagem, a esfericidade baseada na área determinada pela equação:

$$\text{Esfericidade} = 4\pi A / P^2 \quad (9)$$

Onde A é a área da partícula, P o perímetro e o número final da equação varia de 0 a 1, sendo 1 um círculo perfeito.

O valor de arredondamento é impossível de se obter, uma vez que o maior círculo inscrito no grão não é medido.

Deve-se ressaltar que a esfericidade apresentada é calculada em imagens 2D (bidimensional) e por isso, é diferente daquela proposta por Zingg e tradicionalmente utilizada para seixos e grânulos, no qual o grão é avaliado tridimensionalmente; entretanto se mostra útil na determinação da esfericidade como observado por D'Agostino (2004) com a utilização da relação de aspecto para avaliar esfericidade.

Esta técnica é, atualmente, inédita no país, sendo aplicada, internacionalmente, em um vasto campo de disciplinas, onde este tipo de instrumentação também está em processo de normalização internacional pela “*International Organization for Standardization*” - ISO 13322-2/06 - *Particle size analysis -- Image analysis methods - Part 2: Dynamic image analysis methods* (2006).

Esta etapa foi realizada no Laboratório da Micronal situado nas dependências do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) com a utilização do equipamento RapidVUE da Beckman Instruments.

4.4. Simulação Hidráulica Aplicada a Rejeitos de Mineração

O modelo em escala reduzida foi executado em parceria com o Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos (CTH) do Departamento de

Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, o qual dispõe de tanques para simulação de canais. As características de lançamento (altura, vazão, concentração) foram condicionadas às características reais de cada tipo de rejeito. Após o lançamento foram realizadas análises “*in situ*” a respeito da sedimentação e coletadas amostras em diferentes posições, respeitando o modelo de plano de amostragem de campo, para análises de caracterização dos rejeitos. Todos os ensaios foram acompanhados por câmera fotográfica para ilustração dos processos.

Apesar das limitações relativas ao efeito de escala, discutido no capítulo “3.3 *Simulação Hidráulica*” e a partir dos trabalhos de Hooke (1968), Yalin (1971), Sharp (1981), Küpper (1991), Küpper et al. (1992a) e Ribeiro (2000), dentre outros, verifica-se que um dos caminhos para avaliar e otimizar os projetos de aterros hidráulicos tem sido a utilização dos modelos de laboratório. Ressalta-se também que as características destes modelos aplicados a aterros hidráulicos e leques aluviais não satisfazem o formalismo da modelagem tradicionalmente utilizada na área de engenharia hidráulica.

Neste sentido e, em função da finalidade técnica e econômica deste projeto, o equipamento de simulação de deposição hidráulica (ESDH) utilizado para execução desta pesquisa envolveu um modelo reduzido baseado nas recomendações propostas por Hooke (1968), e equipamentos semelhantes de Küpper (1991), Küpper et al. (1992a), Ribeiro (2000) e Arnez (2004) além dos diversos modelos relacionados às simulações citados no capítulo “3.3 *Simulação Hidráulica*”.

A concepção geral do equipamento é baseada em três partes fundamentais que funcionam de forma integrada durante todo o período de realização dos ensaios, de forma a permitir o controle do fluxo da polpa e condições necessárias para um processo controlado de deposição hidráulica. As três partes constituintes do ESDH são: canal de deposição, sistema de alimentação/preparação e sistema de descarga. A Figura 57 mostra um esquema do ESDH utilizado no presente estudo já demonstrado em Sumi (2005).

Figura 57 – Equipamento de Simulação de Deposição Hidráulica (ESDH) utilizado no presente estudo. (fonte: modificado de Sumi, 2005)

O canal de deposição, onde são realizadas as simulações de descarga e onde ocorre a formação do depósito, tem cerca de 16m de comprimento (Figura 58). Este canal foi adaptado com a colocação de um “dique de partida” ou “inicial” na porção intermediária do canal (Figura 59 e 60), resultando nas seguintes dimensões:

comprimento = 8,00m, largura = 0,50m e altura = 0,80m.

Figura 58 – Canal de deposição do Departamento de Engenharia Hidráulica (POLI-USP) utilizado no presente estudo. (fonte: Arnez, 2004)

Figura 59 – Vista do canal utilizado para simulação de deposição hidráulica.

Figura 60 – Vista em diferentes perspectivas (a e b) do “dique de partida” utilizado no ESDH. Observar vedação completa no contato dique / parede de vidro.

O canal existente é composto por perfis metálicos laterais que sustentam as paredes de vidro temperado com cerca de $1,00\text{m}^2$ e 10mm de espessura, capazes de suportar o empuxo provocado pelo material depositado. Este tipo de parede permite a visualização do processo de deposição ao longo de toda extensão do canal (Figura 61a).

Destaca-se que os contatos entre as placas de vidro do canal são constituídos de modo a minimizar a existência de irregularidades e descontinuidades na parte interna e no contato entre as placas de vidro (Figura 61b). Este tipo de cuidado visa evitar problemas no regime de fluxo dentro do canal advindos destas possíveis fontes de perturbação.

Figura 61 – Vista das paredes de vidro do canal com suporte lateral externo de perfis metálicos (a) e internamente com continuidade no contato vidro / vidro (b).

A base do canal é constituída por uma chapa metálica com alguns ressaltos transversais sistematicamente distribuídos, a cada 15cm, resultando assim, em uma superfície rugosa e capaz de resistir aos esforços provocados pelo peso do material lançado.

O sistema de preparação/alimentação do ESDH aplicado no presente trabalho é composto por um único reservatório, com capacidade de 120 litros (graduado), localizado sobre suporte metálico, apoiado na parte superior e paredes do canal, onde é feita a preparação da mistura (Figura 62a). Para avaliar a concentração da mistura e a eficiência do sistema de mistura foi utilizado um reservatório de mistura em acrílico incolor e transparente (Figura 62b).

A adoção de um sistema único de alimentação representou um problema adicional na concepção e construção do ESDH. Neste tipo de construção era necessária a utilização de um sistema de mistura eficiente e que garantisse uma concentração constante durante todo período de realização do ensaio. As limitações da velocidade de rotação das pás (hélice) do motor elétrico utilizado e as dimensões do reservatório poderiam prejudicar a uniformidade da mistura ao longo do próprio reservatório.

Figura 62 – Vista geral do sistema de alimentação/preparação composto por reservatório, motor para agitação e válvula para controle de fluxo (a), confeccionado em acrílico incolor e transparente para avaliar eficiência da mistura sólido/água (b).

Diante disto, e devido aos altos valores da densidade das partículas de ferro presentes no rejeito analisado, especialmente aqueles provenientes da região de Mariana, MG, um sistema simples de agitação não foi suficiente para manter as partículas em suspensão e garantir a eficiência da mistura. Assim, após uma longa avaliação da real capacidade dos sistemas de mistura, optou-se por realizar apenas o ensaio da mistura de menor concentração, no caso proveniente da Mina Alegria, com densidade aproximada de 1,3 e trabalhando com metade da capacidade do reservatório.

A descarga da polpa homogeneizada do tanque foi feita através de uma abertura na base, porção central do tanque, com controlador de fluxo (válvula) e tubo flexível incolor (Figura 63). O objetivo deste dispositivo é estabelecer uma vazão constante e o mais uniforme possível.

O sistema de descarga foi conectado ao tanque principal por meio de um tubo flexível incolor e transparente permitindo a sua movimentação vertical à medida que havia a subida da crista do aterro e de crescimento do depósito no canal. Durante a fase inicial do projeto foram testadas duas formas de lançamento: único ponto (Figura 64a) e quatro pontos (Figura 64b). O sistema de um único ponto foi executado com a utilização da seção total do tubo flexível (1") e para o sistema de quatro pontos foi executado um "T" em PVC, com a parte inferior perfurada (8mm) em quatro pontos.

Figura 63 – Controlador de fluxo utilizado com saída em tubo flexível incolor e transparente.

Figura 64 – Vista em perfil do sistema de descarga da polpa do rejeito em um único ponto (a) e parte final do “T” com quatro pontos (b).

A idéia deste sistema com quatro pontos originou-se da observação de um dos pontos de lançamento em Mariana como ilustrado na Figura 65.

Durante estes testes, utilizando um único ponto de lançamento, constatou-se o grande fluxo e de maneira irregular, pulsos, o que resultava em grande processo erosivo e de transporte ao longo do canal, sendo abandonado no decorrer do projeto.

Ao final do canal existe uma elevação metálica com cerca de 5cm de forma a manter o nível d'água mínimo constante ao final da praia, gerando, assim, a formação de uma pequena lagoa na base do depósito.

Todos os sistemas apresentados funcionaram de forma integrada e compõem o arranjo geral do equipamento. Uma conexão direta foi estabelecida entre eles desde a fase inicial, no momento da preparação da mistura, até a descarga final no

canal, com a realização prévia de todos os ajustes de forma a garantir o perfeito desempenho do equipamento.

Figura 65 – Sistema de descarga adotado em um dos pontos de lançamento na Barragem de Campo Grande, em Mariana, MG.

Considerando-se a semelhança necessária, o material foi preparado com uma concentração pré-definida, estabelecendo as condições previamente informadas para cada tipo de polpa e rejeito associado. Os sólidos, previamente secos em estufa, foram introduzidos diretamente no reservatório com auxílio de baldes e acompanhados pelo complemento de água.

Após a estabilização da concentração no reservatório que, geralmente ocorria após 5 minutos, a polpa foi lançada no canal através do sistema de descarga. Em todos os ensaios optou-se por realizar a deposição sempre próxima à superfície do aterro (altura de lançamento próxima de zero) e assim o sistema de descarga se manteve sempre próximo à cota da crista do aterro de forma semelhante ao que ocorre no campo.

Em função da mudança do volume do reservatório de mistura da polpa, o fluxo tendia a diminuir no sistema de descarga, o qual era imediatamente corrigido no sistema de alimentação (válvula) de forma a manter a vazão em torno de 6 l/min ou 0,36m³/h.

Em todos os ensaios foram necessários reabastecimentos do reservatório. O ensaio foi paralisado com o fechamento da válvula, procedido pela preparação e homogeneização da mistura e o conseqüente restabelecimento das condições iniciais. Após este procedimento o fluxo foi novamente liberado para a deposição no canal. A vazão e a concentração foram novamente avaliadas e medidas, em intervalos regulares para avaliar as possíveis variações de vazão ocorridas e imediata correção.

O processo de deposição foi acompanhado, verificando-se o comportamento do fluxo sobre a praia e a movimentação dos sedimentos. As paredes de vidro do canal são fundamentais para este tipo de observação, sobretudo na geometria do depósito e perfil longitudinal de deposição. Outro fator importante que facilitou este tipo de observação foi o contraste de cores entre os minerais ricos em ferro, com coloração escura, e os demais minerais, de coloração clara, podendo se perceber didaticamente o mecanismo de deposição e transporte que ocorria. Neste caso, o acompanhamento direto dos ensaios foi fundamental na avaliação do processo de deposição, auxiliando na caracterização do mecanismo de transporte e nas suas interpretações.

Após o lançamento total dos rejeitos, o processo de deposição foi definitivamente paralisado para medição do ângulo médio do perfil longitudinal formado. Posteriormente foram cravadas seringas (“tubo amostrador”) com 2cm de diâmetro conforme marca deixada no sedimento e ilustrado na Figura 66, em intervalos variáveis medidos por trena para amostrar os materiais ao longo da praia, utilizando o vácuo gerado pela seringa para manter o material preso ao “tubo amostrador”, evitando assim a perda de material.

Dentre os pontos amostrados foram selecionados aqueles considerados como mais representativos da sedimentação definidos ao longo da linha central do canal, totalizando para cada simulação 05 amostras. No material selecionado foram executadas análises granulométricas e análise de forma dos rejeitos ao longo do depósito, e a partir delas, foram criados novos questionamentos a respeito do processo de sedimentação e geometria da praia.

Figura 66 – Praia de rejeitos no ESDH com marcas deixadas após sistemática utilizada de amostragem.

5. RESULTADOS

Neste capítulo estão apresentados os resultados das análises laboratoriais e dos ensaios de simulação realizados neste trabalho. Assim, os resultados aqui descritos são agrupados por amostras facilitando a leitura e a compreensão dos dados.

5.1. *Caracterização Química e Mineralógica*

A caracterização química e mineralógica dos materiais foi realizada utilizando-se duas técnicas analíticas complementares, difração de Raios-X e microscopia eletrônica de varredura conforme descrito no item “4. *Materiais e Métodos*”.

5.1.1. **Amostra Barragem B5 - Bunge**

O difratograma de Raios-X obtido para a amostra coletada na barragem B5 da Bunge S/A (Figura 67), revela a presença, principalmente, de quartzo, hidroxiapatita, diopsídio, em menor quantidade anatásio, ilmenita, hematita, magnesioferrita, goethita e goiazita.

As imagens e análises químicas realizadas em microscópio eletrônico de varredura com espectrômetro de Raios-X por dispersão de energia (Energy Dispersion Spectrometer - EDS), apresentadas na série de Figuras 68 a 73, mostram, além destes mesmos minerais, a ocorrência de outros minerais, em especial um de maior abundância e de forma (hábito) distinto dos demais, composto quimicamente pelos elementos Na, Ca, Ti, Fe, Mg, O, Si, Al, não identificado por difração, provavelmente do grupo das cloritas. A ocorrência de minerais micáceos nas rochas lavradas em Araxá é descrita por outros autores como nos estudos do CETEM (2001).

Figura 69 – Espectros obtidos por EDS em microscópio eletrônico de varredura; 1 – quartzo, 2 – cobertura de goethita em quartzo, 3 – hidroxiapatita coberta parcialmente por goethita, 4 – agregado de minerais secundários, 5 – provável romanechita/holandita, 6 – monazita.

Figura 70 – Fotomicrografia com identificação numérica dos espectros de EDS dos grãos presentes na amostra coletada na Barragem B5, Bunge Fertilizantes S/A.

Figura 71 – Espectros obtidos por EDS em microscópio eletrônico de varredura; 7 – hematita/magnetita, 8 – mineral do grupo das cloritas, 9 – goiazita.

Figura 72 – Detalhe da fotomicrografia apresentada na Figura 70 com identificação numérica dos espectros de EDS dos grãos presentes na amostra coletada na Barragem B5, Bunge Fertilizantes S/A.

Figura 73 – Espectros obtidos por EDS em microscópio eletrônico de varredura; **10** – zircão, **11** – anatásio/rutilo.

5.1.2. Amostra Barragem Doutor/ Circuito Timbopeba – CVRD

O difratograma de Raios-X obtido para a amostra coletada na barragem Doutor da CVRD revela a presença de quartzo, hematita e traços de goethita (Figura 74).

Figura 74 – Difratograma de Raios-X da amostra coletada na Barragem Doutor, CVRD S/A.

As imagens e microanálises químicas realizadas em microscópio eletrônico de varredura com EDS, apresentadas na série de Figuras 75 a 79, mostram a mesma composição mineralógica identificada por difração de Raios-X.

Figura 75 – Fotomicrografia com identificação numérica dos espectros de EDS dos grãos presentes na amostra coletada na Barragem Doutor, CVRD S/A.

Figura 76 – Detalhe da fotomicrografia apresentada na Figura 75 com identificação numérica dos espectros de EDS dos grãos da amostra coletada na Barragem Doutor, CVRD S/A.

Figura 77 – Espectros obtidos por EDS em microscópio eletrônico de varredura; 1 – quartzo. 2 – hematita, 3 e 4 – Goethitas com diferentes teores de Mn, Al, Si, P, 5 – Hematita.

Figura 78 – Detalhe do grão com identificação numérica dos espectros de EDS realizados em amostra coletada na Barragem Doutor, CVRD S/A.

Figura 79 – Espectros obtidos por EDS em microscópio eletrônico de varredura; cobertura de argilomineral (6) em grão de hematita (7).

5.1.3. Amostra Barragem Campo Grande/ Circuito Alegria - CVRD

O difratograma de Raios-X obtido para a amostra coletada na barragem Campo Grande da CVRD revelou a presença de quartzo, hematita e, secundariamente, magnetita e goethita como demonstrado na Figura 80.

Figura 80 – Difratograma de Raios-X da amostra coletada na Barragem Campo Grande, CVRD S/A.

As imagens e microanálises químicas realizadas em microscópio eletrônico de varredura com EDS são apresentadas na série de Figuras 81 a 85.

Figura 81 – Fotomicrografia com identificação numérica dos espectros de EDS realizados nos grãos da amostra coletada na Barragem Campo Grande, CVRD S/A.

Figura 82 – Fotomicrografia dos grãos da Barragem Campo Grande, CVRD com identificação numérica dos espectros de EDS realizados nos grãos da amostra coletada na Barragem Campo Grande, CVRD S/A

Figura 83 – Espectros obtidos por EDS em microscópio eletrônico de varredura; 1 –quartzo, 2 – hematita, 3 – argilomineral, 4 – hematita com alguma cobertura de argilomineral..

Figura 84 – Fotomicrografia dos grãos presentes na Barragem Campo Grande, CVRD S/A, com identificação numérica dos espectros de EDS realizados.

Figura 85 – Espectros obtidos por EDS em microscópio eletrônico de varredura; **5** – Magnetita, **6** – Hematita, **7 e 8** – hematitas com alguma cobertura de argilominerais.

5.2. Análise granulométrica

Como apresentado em “4. Materiais e Métodos” a análise granulométrica foi realizada utilizando diferentes técnicas. Deste modo, em cada uma das barragens analisadas são apresentadas as curvas granulométricas resultantes e respectivos dados estatísticos.

Os dados originais fornecidos pelos equipamentos podem ser visualizados no Anexo A – Análise granulométrica.

5.2.1. Amostra Barragem B5 - Bunge

As curvas granulométricas de frequência acumulada resultantes do uso do granulômetro a laser (Figura 86) revelam, para a barragem B5, comportamento muito similar, apenas com destaque para as amostras na região de 10metros (B-10mLE) e 20 metros (B-20mLD, B-20mLE) com maior presença de frações mais grossas (areia fina).

Este comportamento similar permite classificar todas as amostras como areia fina pouco siltosa.

Figura 86– Análise granulométrica por granulômetro a laser da Barragem B5.

Os dados estatísticos (Tabela 12) demonstram este mesmo comportamento, no qual todas as amostras têm valores de D_{50} com pequena variação, pouco expressiva, com valores entre 0,084mm e 0,156mm. Os valores de permeabilidade estimados a partir do diâmetro efetivo D_{10} situam-se em torno de 10^{-3} a 10^{-4} cm/s.

Na análise de coeficiente de uniformidade (CU) as amostras alternam valores limites, sendo variáveis entre muito uniforme ($CU < 5$) e de uniformidade média ($5 < CU < 15$). Em relação ao coeficiente de curvatura (CC), todas as amostras estão no valor limite inferior para serem classificadas como bem graduada ($1 < CC < 3$).

Tabela 12– Dados estatísticos obtidos a partir da análise granulométrica por granulômetro a laser da Barragem B5.

Dados estatísticos	B								
	0m	5m	10m	10mLD	10mLE	20m	20mLD	20mLE	40m
D_{10}	0,022	0,022	0,026	0,043	0,034	0,023	0,038	0,029	0,021
D_{30}	0,057	0,058	0,061	0,092	0,077	0,058	0,092	0,067	0,054
Mediana (D_{50})	0,084	0,087	0,088	0,156	0,111	0,087	0,133	0,095	0,080
D_{60}	0,113	0,119	0,118	0,175	0,147	0,120	0,175	0,126	0,108
D_{90}	0,227	0,245	0,220	0,343	0,267	0,244	0,306	0,232	0,215
Mínimo	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Máximo	0,556	0,556	0,477	0,754	0,556	0,556	0,647	0,477	0,477
1º quartil	0,050	0,050	0,053	0,080	0,068	0,050	0,080	0,059	0,047
3º quartil	0,137	0,145	0,140	0,215	0,168	0,148	0,191	0,148	0,130
CU	5	5	5	4	4	5	5	4	5
CC	1	1	1	1	1	1	1	1	1
K estimado (cm/s)	$4,84 \cdot 10^{-4}$	$4,84 \cdot 10^{-4}$	$6,76 \cdot 10^{-4}$	$1,85 \cdot 10^{-3}$	$1,16 \cdot 10^{-3}$	$5,29 \cdot 10^{-4}$	$1,44 \cdot 10^{-3}$	$8,41 \cdot 10^{-4}$	$4,41 \cdot 10^{-4}$

A análise da variação de comportamento dos dados estatísticos obtidos para as amostras da barragem B5 pode ser feita ainda no gráfico do tipo “*boxplot*” da Figura 87, onde podem ser observados os valores limites da análise granulométrica por granulômetro a laser (mínimo e máximo) em cada amostra, bem como os valores dos quartis e a mediana.

Neste gráfico observa-se que as amostras possuem pequena variação de seus valores medianos e quartis, e de maneira irregular, não evidenciando tendência de diminuição ou aumento dos valores à medida que se afasta do “*spigot*” e caminha em direção à lagoa de decantação, ou seja, de 0m a 40m.

Figura 87 – Representação dos dados estatísticos resultantes da análise granulométrica por granulômetro a laser da Barragem B5.

Os resultados obtidos de D_{50} podem ser visualizados em planta na Figura 88.

Figura 88 – Representação em planta dos valores de D_{50} resultantes da análise granulométrica por granulômetro a laser da Barragem B5.

O padrão de distribuição demonstra pequena diminuição da granulometria à medida que se afasta do ponto de lançamento (“spigot”) e lateralmente, de forma a concentrar deposição de partículas mais grossas nas porções laterais proximais.

Na análise granulométrica realizada por peneiramento a úmido, as curvas granulométricas de frequência acumulada resultantes (Figura 89) novamente revelam, para a barragem B5, comportamento muito similar, com destaque para as amostras na região de 10metros (B-10mLE, B-10mLD) e 20metros (B-20mLD, B-20mLE) com maior presença de frações mais grossas (areia fina). É importante ressaltar que esta representação gráfica tem interpolação entre os pontos da fração mais fina adotada e o fundo (0,000mm).

Todas as curvas apresentam deslocamento para frações mais finas quando comparadas àquelas obtidas por granulômetro a laser, o que permite classificar todas as amostras como areia fina siltosa.

Figura 89 – Análise granulométrica por peneiramento a úmido da Barragem B5.

Os dados estatísticos (Tabela 13) demonstram esse mesmo comportamento, no qual todas as amostras têm D_{50} , mediana, entre 0,053mm e 0,093mm, com destaque para as amostras de fração mais grossa situados nas laterais da região de

10m e 20m do ponto de lançamento. A estimativa da permeabilidade pela fórmula de Hazen define valores de em torno de 10^{-4} cm/s.

Na análise de coeficiente de uniformidade (CU) as amostras alternam valores entre 4 e 5, sendo classificadas como muito uniforme ($CU < 5$) a uniformidade média ($5 < CU < 15$). Na análise do coeficiente de curvatura (CC) todas as amostras estão acima do limite inferior, assim, classificadas como bem graduada ($1 < CC < 3$).

Tabela 13– Dados estatísticos obtidos a partir da análise granulométrica por peneiramento a úmido da Barragem B5.

Dados estatísticos	B								
	0m	5m	10m	10mLD	10mLE	20m	20mLD	20mLE	40m
D₁₀	0,014	0,013	0,015	0,026	0,023	0,014	0,025	0,020	0,013
D₃₀	0,038	0,037	0,040	0,055	0,048	0,039	0,053	0,045	0,038
Mediana (D₅₀)	0,053	0,053	0,057	0,093	0,069	0,056	0,082	0,065	0,054
D₆₀	0,064	0,065	0,067	0,119	0,086	0,067	0,104	0,076	0,065
D₉₀	0,141	0,145	0,151	0,220	0,183	0,155	0,201	0,161	0,141
Mínimo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Máximo	0,210	0,210	0,210	0,210	0,210	0,210	0,210	0,210	0,210
1º quartil	0,034	0,032	0,037	0,048	0,043	0,035	0,047	0,041	0,033
3º quartil	0,090	0,094	0,097	0,159	0,122	0,099	0,138	0,111	0,091
CU	5	5	4	5	4	5	4	4	5
CC	2	2	2	1	1	2	1	1	2
K estimado (cm/s)	$1,96 \cdot 10^{-4}$	$1,69 \cdot 10^{-4}$	$2,25 \cdot 10^{-4}$	$6,76 \cdot 10^{-4}$	$5,29 \cdot 10^{-4}$	$1,96 \cdot 10^{-4}$	$6,25 \cdot 10^{-4}$	$4,00 \cdot 10^{-4}$	$1,69 \cdot 10^{-4}$

A análise da variação de comportamento dos dados estatísticos obtidos pelo peneiramento a úmido, para as amostras da barragem B5, pode ser feita ainda no gráfico do tipo “*boxplot*” da Figura 90, onde podem ser observados os valores limites da análise granulométrica por granulômetro a laser (mínimo e máximo) em cada amostra, bem como os valores dos quartis e a mediana.

Neste gráfico observa-se que as amostras possuem similaridade de seus valores medianos e quartis, e se distribuem com maiores valores na região central da amostragem (10 e 20m do ponto de lançamento), com continuidade dos valores entre a amostra inicial (B-0m) e final (B-40m), não evidenciando tendência de diminuição ou aumento dos valores à medida que se afasta do “*spigot*” e caminha em direção à lagoa de decantação, ou seja, de 0m a 40m.

Figura 90 – Representação dos dados estatísticos resultantes da análise granulométrica por peneiramento a úmido da Barragem B5.

O padrão de distribuição dos valores de D_{50} pode ser observado na Figura 91.

Figura 91 – Representação em planta dos valores de D_{50} resultantes da análise granulométrica por peneiramento a úmido da Barragem B5.

A planta revela que há diminuição da granulometria à medida que se afasta do ponto de lançamento (“spigot”) e lateralmente, de forma a concentrar deposição de partículas mais grossas nas porções laterais proximais.

As curvas granulométricas de frequência acumulada obtidas após análise de imagens (Figura 92) revelam, para a barragem B5, comportamento similar, com destaque para as amostras B-10m, B-10mLD, B-10mLE, B-20mLD e B-20mLE com maior presença de frações mais grossas (areia fina).

Este comportamento similar permite classificar todas as amostras como areia fina pouco siltosa.

Figura 92 – Análise granulométrica por análise de imagem da Barragem B5.

Os dados estatísticos (Tabela 14) demonstram este mesmo comportamento, no qual todas as amostras têm D_{50} com valores entre 0,107mm e 0,154mm, com destaque para as amostras de fração mais grossa situados nas regiões à 10m e 20m do ponto de lançamento. Os valores de permeabilidade estimados são da ordem de 10^{-3} cm/s.

Tabela 14– Dados estatísticos obtidos a partir da análise granulométrica por análise de imagem da Barragem B5.

Dados estatísticos	B								
	0m	5m	10m	10mLD	10mLE	20m	20mLD	20mLE	40m
D₁₀	0,048	0,050	0,067	0,076	0,066	0,051	0,070	0,068	0,048
D₃₀	0,076	0,081	0,110	0,125	0,101	0,085	0,114	0,108	0,077
Mediana (D₅₀)	0,107	0,117	0,154	0,182	0,144	0,123	0,160	0,150	0,110
D₆₀	0,121	0,133	0,172	0,201	0,158	0,139	0,180	0,168	0,125
D₉₀	0,230	0,238	0,286	0,343	0,277	0,272	0,306	0,283	0,233
Mínimo	0,016	0,016	0,016	0,000	0,000	0,016	0,016	0,016	0,016
Máximo	0,486	0,516	0,551	0,001	0,001	0,716	0,756	0,710	0,619
1º quartil	0,071	0,075	0,102	0,118	0,097	0,078	0,106	0,100	0,072
3º quartil	0,160	0,174	0,217	0,261	0,207	0,190	0,229	0,214	0,165
CU	3	3	3	3	2	3	3	2	3
CC	1	1	1	1	1	1	1	1	1
K estimado (cm/s)	$2,30 \cdot 10^{-3}$	$2,50 \cdot 10^{-3}$	$4,49 \cdot 10^{-3}$	$2,70 \cdot 10^{-3}$	$2,21 \cdot 10^{-3}$	$2,60 \cdot 10^{-3}$	$4,90 \cdot 10^{-3}$	$4,62 \cdot 10^{-3}$	$2,30 \cdot 10^{-3}$

Na análise de imagem, os valores de coeficiente de uniformidade (CU) apresentam significativa redução, com valores entre 3 e 2, sendo, portanto, todas classificadas como muito uniforme ($CU < 5$). Na análise do coeficiente de curvatura (CC) todas as amostras estão no valor limite inferior, sendo, portanto, classificadas como bem graduada ($1 < CC < 3$).

Na Figura 93 é possível analisar a variação de comportamento dos dados estatísticos obtidos por análise de imagem, para as amostras da barragem B5, no formato de gráfico do tipo “*boxplot*”. Nesta figura podem ser observados os valores limites da análise granulométrica por granulômetro a laser (mínimo e máximo) em cada amostra, bem como os valores dos quartis e a mediana.

Observa-se que, nesse gráfico, as amostras possuem similaridade de seus valores medianos e quartis, e se distribuem com maiores valores na região central da amostragem (10 a 20m do ponto de lançamento), com similaridade entre os valores inicial, amostra D-0m e final, amostra D-40m, não evidenciando tendência de diminuição ou aumento dos valores à medida que se afasta do “*spigot*” e caminha em direção à lagoa de decantação, ou seja, de 0m a 40m.

Figura 93 – Representação dos dados estatísticos resultantes da análise granulométrica por análise de imagem da Barragem B5.

Os resultados obtidos de D_{50} podem ser visualizados, em planta, na Figura 94.

Figura 94 – Representação em planta dos valores de D_{50} resultantes da análise granulométrica por análise de imagem da Barragem B5.

O padrão dos valores de D_{50} é caracterizado por manchas de maior granulometria nas laterais e centro da amostragem, porção proximal, com pequena diminuição da granulometria à medida que se afasta do ponto de lançamento (“spigot”), porção distal.

5.2.2. Amostra Barragem Doutor/ Circuito Timbopeba – CVRD

As curvas granulométricas de frequência acumulada resultantes do uso do granulômetro a laser (Figura 95) revelam, para a barragem Doutor, comportamento muito similar entre boa parte das amostras. Destacam-se, entretanto, a formação de outros dois grupos, formados por amostras mais finas, D-20m e D-80m, e mais grossas, D-10m e D-20mLE.

Este comportamento similar permite classificar boa parte das amostras como areia fina pouco siltosa, e aquelas consideradas mais finas como silte arenoso.

Figura 95 – Análise granulométrica por granulômetro a laser da Barragem Doutor.

Os dados estatísticos (Tabela 15) demonstram este mesmo comportamento observado na curva de frequência acumulada, no qual as amostras têm D_{50} com valores entre 0,051mm e 0,114mm. Os valores de permeabilidade estimados são da ordem de 10^{-4} cm/s.

Na análise de coeficiente de uniformidade (CU) as amostras alternam valores entre 3 e 8, fazendo com que as de 20m, 40m e 80m sejam classificadas como muito uniforme, e, as demais, dentro de intervalo de classificação de uniformidade média ($5 < CU < 15$). Com relação ao coeficiente de curvatura (CC), todas as amostras situam-se no intervalo de classificação bem graduada ($1 < CC < 3$).

Tabela 15– Dados estatísticos obtidos a partir da análise granulométrica por granulômetro a laser da Barragem Doutor.

Dados estatísticos	D									
	0m	5m	10m	10mLD	10mLE	20m	20mLD	20mLE	40m	80m
D₁₀	0,017	0,018	0,019	0,020	0,021	0,022	0,023	0,024	0,025	0,026
D₃₀	0,048	0,066	0,082	0,044	0,053	0,037	0,061	0,083	0,052	0,031
Mediana (D₅₀)	0,079	0,098	0,114	0,077	0,092	0,058	0,104	0,130	0,079	0,051
D₆₀	0,109	0,128	0,146	0,109	0,129	0,079	0,140	0,171	0,106	0,074
D₉₀	0,204	0,210	0,228	0,215	0,232	0,154	0,238	0,273	0,184	0,167
Mínimo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Máximo	0,409	0,351	0,409	0,477	0,409	0,302	0,409	0,477	0,351	0,351
1º quartil	0,041	0,056	0,071	0,036	0,044	0,031	0,050	0,068	0,044	0,027
3º quartil	0,152	0,167	0,186	0,157	0,177	0,111	0,187	0,222	0,142	0,114
CU	6	7	8	5	6	4	6	7	4	3
CC	1	2	2	1	1	1	1	2	1	1
K estimado (cm/s)	$2,89 \cdot 10^{-4}$	$3,24 \cdot 10^{-4}$	$3,61 \cdot 10^{-4}$	$4,00 \cdot 10^{-4}$	$4,41 \cdot 10^{-4}$	$4,84 \cdot 10^{-4}$	$5,29 \cdot 10^{-4}$	$5,76 \cdot 10^{-4}$	$6,25 \cdot 10^{-4}$	$6,76 \cdot 10^{-4}$

A análise da variação de comportamento dos dados estatísticos obtidos para as amostras da barragem Doutor pode ser feita ainda no gráfico do tipo “*boxplot*” da Figura 96, onde podem ser observados os valores limites da análise granulométrica por granulômetro a laser (mínimo e máximo) em cada amostra, bem como os valores dos quartis e a mediana.

Neste gráfico observa-se que as amostras possuem variação de seus valores medianos e quartis, e de maneira irregular, com pequena tendência de diminuição dos valores à medida que se afasta do “*spigot*” e caminha em direção à lagoa de decantação, ou seja, de 0m a 80m.

Figura 96 – Representação dos dados estatísticos resultantes da análise granulométrica por granulômetro a laser da Barragem Doutor

Os dados de granulometria, D_{50} , podem observados em planta na Figura 97.

Figura 97 – Representação em planta dos valores de D_{50} resultantes da análise granulométrica por granulômetro a laser da Barragem Doutor.

A planta revela um padrão de manchas de concentração na porção proximal, com tendência de acúmulo nas laterais. Somado a este comportamento há diminuição da granulometria à medida que se afasta do ponto de lançamento (“spigot”) ao longo do eixo central de amostragem, de forma a concentrar deposição de partículas mais fina nas porções centrais distais.

As curvas granulométricas de frequência acumulada resultantes do peneiramento a úmido (Figura 98) revelam, para a barragem Doutor, comportamento muito similar entre boa parte das amostras. Entretanto é possível observar a mudança de comportamento em algumas amostras, e nestas destacam-se as amostras situadas a 20m e 80m do ponto de lançamento, formadas por frações mais finas, e D-10m e D-20mLE constituídas por frações mais grossas. Destaca-se que esta representação gráfica tem interpolação entre os pontos da fração mais fina adotada e o fundo (0,000mm).

Figura 98 – Análise granulométrica por peneiramento a úmido da Barragem Doutor.

Apesar desta distinção entre as amostras todas podem ser classificadas como areia fina siltosa.

Os dados estatísticos (Tabela 16) evidenciam o comportamento observado na curva de frequência acumulada, na qual os valores de D_{50} seguem com valores

variáveis entre 0,036mm e 0,074mm. Os valores de permeabilidade estimados são variáveis em torno de 10^{-4} a 10^{-5} cm/s.

Na análise de coeficiente de uniformidade (CU) as amostras alternam valores entre 6 e 8, o que permite classificar todas as amostras como de uniformidade média ($5 < CU < 15$). Em relação ao coeficiente de curvatura (CC), com exceção da amostra 10LE que apresenta valor 0, todas as amostras situam-se no intervalo de classificação de bem graduada ($1 < CC < 3$).

Tabela 16 – Dados estatísticos obtidos a partir da análise granulométrica por peneiramento a úmido da Barragem Doutor.

Dados estatísticos	D									
	0m	5m	10m	10mLD	10mLE	20m	20mLD	20mLE	40m	80m
D₁₀	0,009	0,013	0,017	0,009	0,010	0,008	0,011	0,013	0,011	0,007
D₃₀	0,026	0,038	0,043	0,027	0,007	0,023	0,031	0,031	0,031	0,021
Mediana (D₅₀)	0,042	0,063	0,074	0,043	0,045	0,038	0,054	0,067	0,050	0,036
D₆₀	0,057	0,080	0,096	0,060	0,065	0,045	0,076	0,101	0,064	0,042
D₉₀	0,141	0,147	0,163	0,143	0,163	0,108	0,172	0,196	0,135	0,121
Mínimo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Máximo	0,210	0,210	0,210	0,210	0,210	0,210	0,210	0,210	0,210	0,210
1º quartil	0,022	0,033	0,039	0,022	0,025	0,019	0,026	0,033	0,026	0,018
3º quartil	0,093	0,114	0,125	0,096	0,111	0,067	0,122	0,141	0,093	0,067
CU	7	6	6	7	7	6	7	8	6	6
CC	1	1	1	1	0	2	1	1	1	2
K estimado (cm/s)	$8,10 \cdot 10^{-5}$	$1,69 \cdot 10^{-4}$	$2,89 \cdot 10^{-4}$	$8,10 \cdot 10^{-5}$	$1,00 \cdot 10^{-4}$	$6,40 \cdot 10^{-5}$	$1,21 \cdot 10^{-4}$	$1,69 \cdot 10^{-4}$	$1,21 \cdot 10^{-4}$	$4,90 \cdot 10^{-5}$

Os dados estatísticos obtidos para as amostras da barragem Doutor podem ser visualizados no gráfico do tipo “*boxplot*” da Figura 99, onde se observam os valores limites da análise granulométrica por granulômetro a laser (mínimo e máximo) em cada amostra, bem como os valores dos quartis e a mediana.

Neste gráfico conclui-se que as amostras possuem variação de seus valores medianos e quartis, e de maneira irregular, com maiores valores situados nas porções laterais, D-10mLE e D-20mLE, e pequena tendência de diminuição dos valores à medida que se afasta do “*spigot*” e caminha em direção à lagoa de decantação, ou seja, de 0m a 80m.

Figura 99 – Representação dos dados estatísticos resultantes da análise granulométrica por peneiramento a úmido da Barragem Doutor.

O dados apresentados de D_{50} podem ser vistos em planta na Figura 100.

Figura 100 – Representação em planta dos valores de D_{50} resultantes da análise granulométrica por peneiramento a úmido da Barragem Doutor.

A planta revela um padrão de manchas de concentração na porção proximal, com tendência de acúmulo na lateral esquerda. Somado a este comportamento há diminuição da granulometria à medida que se afasta do ponto de lançamento (“spigot”) ao longo do eixo central de amostragem e para a direita, de forma a concentrar deposição de partículas mais fina nas porções centrais distais.

As curvas granulométricas de frequência acumulada obtidas após análise de imagens (Figura 101) revelam, para a barragem Doutor, comportamento similar, com destaque apenas para a amostra na região de 20 metros (D-20m) com presença acentuada de frações mais finas.

As curvas observadas permitem classificar todas as amostras como areia fina pouco siltosa.

Figura 101 – Análise granulométrica por análise de imagem da Barragem Doutor.

Os dados estatísticos (Tabela 17) evidenciam o comportamento observado na curva de frequência acumulada, no qual as amostras têm valores de D_{50} entre 0,095mm e 0,143mm. Os valores de permeabilidade estimados, k , são variáveis em torno de 10^{-4} a 10^{-5} cm/s.

Tabela 17– Dados estatísticos obtidos a partir da análise granulométrica por análise de imagem da Barragem Doutor.

Dados estatísticos	D									
	0m	5m	10m	10mLD	10mLE	20m	20mLD	20mLE	40m	80m
D₁₀	0,047	0,058	0,066	0,052	0,047	0,043	0,050	0,055	0,050	0,043
D₃₀	0,077	0,096	0,106	0,086	0,079	0,069	0,086	0,093	0,082	0,071
Mediana (D₅₀)	0,110	0,131	0,143	0,123	0,119	0,095	0,126	0,141	0,112	0,104
D₆₀	0,125	0,144	0,157	0,139	0,137	0,106	0,143	0,160	0,124	0,119
D₉₀	0,208	0,223	0,243	0,233	0,227	0,172	0,230	0,260	0,195	0,198
Mínimo	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
Máximo	0,398	0,532	0,536	0,483	0,408	0,413	0,443	0,571	0,475	0,464
1º quartil	0,071	0,089	0,099	0,079	0,073	0,064	0,079	0,085	0,076	0,066
3º quartil	0,159	0,177	0,193	0,177	0,176	0,133	0,180	0,203	0,153	0,151
CU	3	2	2	3	3	2	3	3	2	3
CC	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
K estimado (cm/s)	$2,21 \cdot 10^{-3}$	$3,36 \cdot 10^{-3}$	$4,36 \cdot 10^{-3}$	$2,70 \cdot 10^{-3}$	$2,21 \cdot 10^{-3}$	$1,85 \cdot 10^{-3}$	$2,50 \cdot 10^{-3}$	$3,03 \cdot 10^{-3}$	$2,50 \cdot 10^{-3}$	$1,85 \cdot 10^{-3}$

Na análise de coeficiente de uniformidade (CU) as amostras alternam valores entre 2 e 3, o que permite classificar todas as amostras como muito uniforme ($CU < 5$). Com relação ao coeficiente de curvatura (CC), todas as amostras estão no limite inferior, dentro do intervalo de classificação bem graduada ($1 < CC < 3$).

Os dados estatísticos obtidos para as amostras da barragem Doutor podem ser visualizados no gráfico do tipo “*boxplot*” da Figura 102.

Figura 102 – Representação dos dados estatísticos resultantes da análise granulométrica por análise de imagem da Barragem Doutor.

Neste gráfico observa-se que as amostras possuem pequena variação de seus valores medianos e quartis, e de maneira irregular. Este padrão não permite estabelecer tendência de diminuição ou aumento dos valores à medida que se afasta do “*spigot*” e caminha em direção à lagoa de decantação, ou seja, de 0m a 80m.

O padrão de distribuição dos valores de D_{50} pode ser observado na Figura 103.

Figura 103 – Representação em planta dos valores de D_{50} resultantes da análise granulométrica por análise de imagem da Barragem Doutor.

A planta revela um padrão de manchas de concentração na porção proximal, com tendência de acúmulo na lateral direita. Somado a este comportamento há diminuição da granulometria à medida que se afasta do eixo central de amostragem e para a esquerda do ponto de lançamento (“*spigot*”), concentrando a deposição de partículas mais fina nas porções laterais.

5.2.3. Amostra Barragem Campo Grande/ Circuito Alegria - CVRD

As curvas granulométricas de frequência acumulada resultantes do uso do granulômetro a laser (Figura 104) revelam, para a barragem Campo Grande, a formação de dois grupos, o primeiro formado pelas amostras constituídas de frações mais grossas, G-0m, G-5m, G-10m, e G-20m; e o segundo pelas amostras com predomínio de material mais fino, G-10LD, G-10LE, G-20LD, G-20LE, G-40m e G-60m, com destaque para a amostra mais fina, G-20LE.

As curvas formadas pelas amostras permitem classificar o primeiro grupo, mais grosso, como areia média, e as demais como areia fina pouco siltosa.

Figura 104 – Análise granulométrica por granulômetro a laser da Barragem Campo Grande.

Os dados estatísticos obtidos (Tabela 18) demonstram o comportamento descrito na curva de frequência acumulada, no qual as amostras têm valores de D_{50} situados entre 0,075mm e 0,337mm. A estimativa da permeabilidade pela fórmula de Hazen confere ao terreno valores de 10^{-3} a 10^{-4} cm/s.

Na análise de coeficiente de uniformidade (CU) as amostras alternam valores entre 5 e 8, classificando-as como de uniformidade média ($5 < CU < 15$). Em relação

ao coeficiente de curvatura (CC), todas as amostras estão no limite inferior dentro do intervalo de classificação bem graduada ($1 < CC < 3$).

Tabela 18– Dados estatísticos obtidos a partir da análise granulométrica por granulômetro a laser da Barragem Campo Grande.

Dados estatísticos	G									
	0m	5m	10m	10mLD	10mLE	20m	20mLD	20mLE	40m	60m
D ₁₀	0,080	0,044	0,059	0,027	0,027	0,037	0,036	0,022	0,032	0,031
D ₃₀	0,225	0,121	0,168	0,067	0,065	0,133	0,088	0,048	0,091	0,085
Mediana (D ₅₀)	0,337	0,229	0,299	0,104	0,098	0,197	0,126	0,075	0,134	0,125
D ₆₀	0,439	0,330	0,415	0,140	0,130	0,309	0,164	0,103	0,175	0,162
D ₉₀	0,702	0,626	0,720	0,241	0,228	0,573	0,268	0,207	0,282	0,264
Mínimo	0,004	0,004	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Máximo	1,193	1,193	1,389	0,477	0,409	0,879	0,556	0,409	0,477	0,477
1º quartil	0,191	0,099	0,138	0,057	0,056	0,108	0,076	0,042	0,077	0,072
3º quartil	0,567	0,473	0,565	0,187	0,175	0,427	0,213	0,148	0,226	0,210
CU	5	7	7	5	5	8	5	5	5	5
CC	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
K estimado (cm/s)	$6,40 \cdot 10^{-3}$	$1,94 \cdot 10^{-3}$	$3,48 \cdot 10^{-3}$	$7,29 \cdot 10^{-4}$	$7,29 \cdot 10^{-4}$	$1,37 \cdot 10^{-3}$	$1,30 \cdot 10^{-3}$	$4,84 \cdot 10^{-4}$	$1,02 \cdot 10^{-3}$	$9,61 \cdot 10^{-4}$

Os dados estatísticos obtidos para as amostras da barragem Campo Grande podem ser visualizados no gráfico do tipo “*boxplot*” da Figura 105, com os valores mínimo e máximo, quartis e mediana da análise granulométrica.

Figura 105 – Representação dos dados estatísticos resultantes da análise granulométrica por granulômetro a laser da Barragem Campo Grande.

Neste gráfico observa-se que as amostras possuem variação de seus valores medianos e quartis, onde, apesar da irregularidade entre as amostras situadas na porção central da amostragem daquelas situadas lateralmente, há uma tendência de diminuição dos valores à medida que se afasta do “*spigot*” e caminha em direção à lagoa de decantação, ou seja, de 0m a 60m.

Os dados de D_{50} obtidos nas análises granulométricas por granulômetro a laser podem ser observados, em planta, na Figura 106.

Figura 106 – Representação em planta dos valores de D_{50} resultantes da análise granulométrica por granulômetro a laser da Barragem Campo Grande.

A planta revela um padrão de manchas de concentração na porção central proximal. O comportamento geral observado mostra a diminuição da granulometria à medida que se afasta do eixo central de amostragem para as laterais e do ponto de lançamento (“*spigot*”), concentrando a deposição de partículas mais fina nas porções laterais e distais.

As curvas granulométricas de frequência acumulada resultantes do peneiramento a úmido (Figura 107) revelam, para a barragem Campo Grande, comportamento variável entre as amostras, com maior presença das frações mais grossas na amostra 0m e, por outro lado, na amostra G-20LE, estão as maiores

quantidades de material mais fino. Destaca-se que nesta representação gráfica há interpolação entre os pontos da fração mais fina adotada e o fundo (0,000mm).

Esta distinção entre as amostras permite que sejam classificadas como areia fina siltosa a pouco siltosa.

Figura 107 – Análise granulométrica por peneiramento a úmido da Barragem Campo Grande.

Os dados estatísticos (Tabela 19) evidenciam o comportamento observado na curva de frequência acumulada, assim os valores de D_{50} nas amostras têm diâmetro variável entre 0,127mm e 0,050mm. A estimativa de permeabilidade utilizando-se o D_{10} resulta em valores em torno de 10^{-4} cm/s.

O coeficiente de uniformidade (CU) das amostras alterna valores entre 6 e 8, classificando todas as amostras como uniformidade média ($5 < CU < 15$). Em relação ao coeficiente de curvatura (CC) todas as amostras estão no limite inferior do intervalo de classificação bem graduada ($1 < CC < 3$).

Os dados estatísticos obtidos para as amostras da barragem Campo Grande podem ser visualizados no gráfico da Figura 108.

Tabela 19– Dados estatísticos obtidos a partir da análise granulométrica por peneiramento a úmido da Barragem Campo Grande.

Dados estatísticos	G									
	0m	5m	10m	10mLD	10mLE	20m	20mLD	20mLE	40m	60m
D₁₀	0,026	0,015	0,024	0,014	0,013	0,014	0,019	0,011	0,019	0,020
D₃₀	0,066	0,040	0,056	0,040	0,039	0,041	0,045	0,032	0,051	0,052
Mediana (D₅₀)	0,127	0,067	0,110	0,066	0,062	0,082	0,085	0,050	0,097	0,095
D₆₀	0,154	0,093	0,135	0,088	0,078	0,114	0,111	0,064	0,118	0,116
D₉₀	0,234	0,212	0,230	0,173	0,177	0,224	0,192	0,144	0,203	0,198
Mínimo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Máximo	0,210	0,210	0,210	0,210	0,210	0,210	0,210	0,210	0,210	0,210
1º quartil	0,055	0,038	0,045	0,036	0,033	0,035	0,041	0,027	0,042	0,043
3º quartil	0,208	0,137	0,189	0,125	0,119	0,163	0,141	0,097	0,146	0,143
CU	6	6	6	6	6	8	6	6	6	6
CC	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
K estimado (cm/s)	$6,76 \times 10^{-4}$	$2,25 \times 10^{-4}$	$5,76 \times 10^{-4}$	$1,96 \times 10^{-4}$	$1,69 \times 10^{-4}$	$1,96 \times 10^{-4}$	$3,61 \times 10^{-4}$	$1,21 \times 10^{-4}$	$3,61 \times 10^{-4}$	$4,00 \times 10^{-4}$

Figura 108 – Representação dos dados estatísticos resultantes da análise granulométrica por peneiramento a úmido da Barragem Campo Grande.

Neste gráfico observa-se que as amostras possuem variação de seus valores medianos e quartis, onde, apesar da irregularidade entre as amostras situadas na porção central da amostragem daquelas situadas lateralmente, há uma tendência de diminuição dos valores à medida que se afasta do “spigot” e caminha em direção à lagoa de decantação, ou seja, de 0m a 60m.

Os dados de D_{50} obtidos nas análises granulométricas por peneiramento a úmido podem ser observados, em planta, na Figura 109.

Figura 109 – Representação em planta dos valores de D_{50} resultantes da análise granulométrica por peneiramento a úmido da Barragem Campo Grande.

A planta demonstra a distribuição em um padrão de manchas de concentração na porção lateral proximal. Estas manchas são constituídas por grãos mais finos resultando na diminuição da granulometria à medida que se afasta do eixo central de amostragem para as laterais, concentrando a deposição de partículas mais fina nas porções laterais proximais.

As curvas granulométricas de frequência acumulada obtidas após análise de imagens (Figura 110) revelam, para a barragem Campo Grande, comportamento similar, com destaque apenas para a amostra na região de 0 metros (G-0m) com maior presença de frações mais grossas.

As curvas observadas permitem classificar todas as amostras como areia fina.

Os dados estatísticos (Tabela 20) demonstram em números o comportamento observado na curva de frequência acumulada, com valores de D_{50} situados entre 0,113mm e 0,168mm. Os valores de permeabilidade estimados são da ordem de 10^{-3} cm/s.

Figura 110 – Análise granulométrica por análise de imagem da Barragem Campo Grande.

O coeficiente de uniformidade (CU) das amostras alterna valores entre 2 e 3, sendo, portanto, classificadas como muito uniforme ($CU < 5$). Os coeficientes de curvatura (CC) de todas as amostras estão no limite inferior do intervalo de classificação bem graduada ($1 < CC < 3$).

Tabela 20 – Dados estatísticos obtidos a partir da análise granulométrica por análise de imagem da Barragem Campo Grande.

Dados estatísticos	G									
	0m	5m	10m	10mLD	10mLE	20m	20mLD	20mLE	40m	60m
D ₁₀	0,069	0,053	0,062	0,062	0,054	0,050	0,066	0,050	0,062	0,065
D ₃₀	0,116	0,086	0,107	0,103	0,087	0,089	0,111	0,081	0,105	0,106
Mediana (D ₅₀)	0,168	0,126	0,153	0,145	0,122	0,129	0,154	0,113	0,144	0,143
D ₆₀	0,190	0,142	0,172	0,162	0,137	0,146	0,170	0,126	0,158	0,156
D ₉₀	0,330	0,250	0,315	0,260	0,231	0,256	0,263	0,211	0,245	0,245
Mínimo	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
Máximo	0,800	0,609	0,718	0,499	0,632	0,560	0,800	0,419	0,471	0,473
1º quartil	0,107	0,080	0,098	0,096	0,081	0,082	0,103	0,076	0,098	0,100
3º quartil	0,244	0,182	0,222	0,201	0,173	0,189	0,208	0,154	0,193	0,192
CU	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2
CC	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
K estimado (cm/s)	$4,76 \cdot 10^{-3}$	$2,81 \cdot 10^{-3}$	$3,84 \cdot 10^{-3}$	$3,84 \cdot 10^{-3}$	$2,92 \cdot 10^{-3}$	$2,50 \cdot 10^{-3}$	$4,36 \cdot 10^{-3}$	$2,50 \cdot 10^{-3}$	$3,84 \cdot 10^{-3}$	$4,23 \cdot 10^{-3}$

Os dados estatísticos obtidos para as amostras da barragem Campo Grande podem ser visualizados no gráfico do tipo “*boxplot*” da Figura 111.

Figura 111 – Representação dos dados estatísticos resultantes da análise granulométrica por análise de imagem da Barragem Campo Grande.

No gráfico da análise por imagem observa-se que as amostras possuem variação de seus valores medianos e quartis, com variação e irregularidade na distribuição dos valores entre as amostras situadas na porção central da amostragem daquelas posicionadas lateralmente. Neste gráfico não é possível determinar uma tendência de diminuição ou aumento dos valores à medida que se afasta do “*spigot*” e caminha em direção à lagoa de decantação, ou seja, de 0m a 60m.

Os dados de D_{50} obtidos nas análises granulométricas por análise de imagem podem ser observados, em planta, na Figura 112. A distribuição em planta evidencia um padrão de deposição de grãos mais finos nas porções proximais e lateral esquerda do ponto de lançamento (“*spigot*”). Este comportamento resulta na diminuição da granulometria à medida que se afasta do eixo central de amostragem para a lateral esquerda, concentrando a deposição de partículas mais fina nas porções laterais proximais.

Figura 112 – Representação em planta dos valores de D_{50} resultantes da análise granulométrica por peneiramento a úmido da Barragem Campo Grande.

5.3. Densidade real dos grãos

Os dados apresentados a seguir formam um resumo estatístico das análises realizadas e apresentadas em detalhes no Apêndice A – Densidade real dos grãos.

Usualmente os dados de densidade real dos grãos são apresentados pura e simplesmente como um valor com três casas decimais conforme estabelecido em norma (ABNT, 1984b; DNER, 1994). Entretanto optou-se pela apresentação de um resumo estatístico com o propósito de avaliar em maior detalhe a variação dos dados apresentados e assim permitir melhor avaliação do comportamento deste parâmetro ao longo das praias de rejeitos.

Para servir de referência às possíveis contribuições dos minerais presentes nas amostras segue abaixo a Tabela 21 com os valores de densidade calculada (teórica).

Tabela 21 – Dados de densidade de alguns minerais presentes nas amostras analisadas.

Mineral	Densidade calculada (g/cm ³)
quartzo	2,66
hematita	5,26
hidroxiapatita	3,13
ilmenita	4,79
magnetita	5,20
grupo da clorita	2,6 – 3,3
anatásio	3,89

Modificado de Mindat, 2007

5.3.1. Amostra Barragem B5 - Bunge

Os valores de densidade real dos grãos obtidos para as amostras da barragem B5 podem ser visualizados no gráfico do tipo “*boxplot*” da Figura 113. Neste gráfico, que apresenta os valores mínimo e máximo medidos, bem como os valores dos quartis e a mediana, observa-se que quando comparadas as amostras situadas nos extremos de amostragem, 0m e 40m, há uma diminuição dos valores à medida que se afasta do “*spigot*” e caminha em direção à lagoa de decantação, ou seja, de 0m a 40m. Entretanto, nas amostras intermediárias há grande variação de seus valores medianos e quartis, especialmente na amostra situada a 5m.

Os dados apresentados na Tabela 22 evidenciam o comportamento observado no gráfico da Figura 113, o qual demonstra as pequenas variações dos valores de densidade real dos grãos entre as amostras, com valor médio em torno de 3,425, e valores máximos e mínimos de 3,486 e 3,317, respectivamente.

Figura 113 – Representação dos dados estatísticos de densidade real dos grãos da Barragem B5.

Tabela 22 – Dados estatísticos de densidade real dos grãos obtidos a partir da análise por picnômetro da Barragem B5.

Densidade real à 20°C	B								
	0m	5m	10m	10mLD	10mLE	20m	20mLD	20mLE	40m
Média	3,440	3,363	3,462	3,404	3,474	3,357	3,463	3,457	3,403
Mediana	3,440	3,362	3,459	3,409	3,483	3,352	3,457	3,460	3,410
Desvio padrão	0,027	0,032	0,015	0,012	0,019	0,016	0,011	0,007	0,014
Variância da amostra	0,0007	0,0010	0,0002	0,0001	0,0003	0,000	0,0001	0,0001	0,0002
Intervalo	0,079	0,082	0,030	0,022	0,034	0,031	0,020	0,013	0,025
Mínimo	3,395	3,317	3,448	3,390	3,453	3,344	3,456	3,449	3,387
Máximo	3,474	3,399	3,478	3,412	3,486	3,376	3,475	3,463	3,412
1º quartil	3,434	3,347	3,453	3,400	3,468	3,348	3,456	3,455	3,398
3º quartil	3,456	3,390	3,468	3,411	3,485	3,364	3,466	3,461	3,411

Os dados de densidade real dos grãos resultantes das análises podem ser observados, em planta, na Figura 114. A distribuição em planta evidencia um padrão de deposição de grãos mais pesados nas porções proximais e laterais do ponto de lançamento (“spigot”). Este comportamento resulta, em geral, na diminuição da densidade real dos grãos à medida que se afasta do ponto de lançamento com concentrações de grãos mais leves nas porções proximais.

Figura 114 – Representação em planta dos valores de densidade da Barragem B5.

5.3.2. Amostra Barragem Doutor/ Circuito Timbopeba – CVRD

Os valores de densidade real dos grãos obtidos para as amostras da barragem Doutor podem ser visualizados no gráfico do tipo “*boxplot*” da Figura 115. Neste gráfico, que apresenta os valores mínimo e máximo medidos, bem como os valores dos quartis e a mediana, observa-se pequenos grupos de amostras que seqüencialmente apresentam tendência de diminuição dos valores com o afastamento do ponto de lançamento (“*spigot*”). Contudo, quando observado o conjunto de amostras e, comparadas àquelas situadas nos extremos de amostragem, 0m e 80m, nota-se variação de comportamento, onde seus valores medianos e quartis chegam a ser maiores na amostra situada mais próxima à lagoa de decantação (D-80m).

Figura 115 – Representação dos dados estatísticos de densidade real dos grãos da Barragem Doutor.

Os dados estatísticos apresentados na Tabela 23 evidenciam o padrão observado no gráfico da Figura 115, e demonstram as variações dos valores de densidade real dos grãos entre as amostras, com valor médio das mesmas em torno de $3,510 \text{ g/cm}^3$, valor mínimo medido de 3,000 e máximo de 3,820.

Tabela 23 – Dados estatísticos de densidade real dos grãos obtidos a partir da análise por picnômetro da Barragem Doutor.

Densidade real à 20°C	D									
	0m	5m	10m	10mLD	10mLE	20m	20mLD	20mLE	40m	80m
Média	3,598	3,311	3,108	3,632	3,608	3,702	3,533	3,400	3,512	3,699
Erro padrão	0,034	0,035	0,026	0,049	0,029	0,024	0,028	0,035	0,005	0,037
Mediana	3,628	3,303	3,099	3,669	3,628	3,715	3,540	3,414	3,507	3,700
Desvio padrão	0,083	0,085	0,064	0,084	0,071	0,058	0,049	0,085	0,008	0,110
Variância da amostra	0,0069	0,0073	0,0041	0,0071	0,0051	0,0034	0,0024	0,0073	0,0001	0,0122
Intervalo	0,220	0,228	0,176	0,156	0,189	0,160	0,096	0,248	0,014	0,362
Mínimo	3,477	3,185	3,005	3,536	3,501	3,594	3,482	3,262	3,507	3,458
Máximo	3,697	3,414	3,181	3,692	3,691	3,754	3,578	3,510	3,521	3,820
1o quartil	3,544	3,272	3,090	3,602	3,563	3,694	3,511	3,365	3,507	3,669
3o quartil	3,640	3,377	3,155	3,680	3,651	3,738	3,559	3,442	3,514	3,768

Os dados de densidade real dos grãos, obtidos nas análises com picnômetro, podem ser ainda observados em planta, na Figura 116.

Figura 116 – Representação em planta dos valores de densidade da Barragem Doutor.

A distribuição em planta evidencia um padrão homogêneo na distribuição da densidade real dos grãos. Este padrão é formado a partir de manchas localizadas de diferentes concentrações, leves e pesados resultando na ausência de alguma tendência seja de diminuição ou aumento da densidade.

5.3.3. Amostra Barragem Campo Grande/ Circuito Alegria - CVRD

Os valores de densidade real dos grãos obtidos para as amostras da barragem Campo Grande podem ser visualizados no gráfico do tipo “*boxplot*” da Figura 117 e Tabela 24. O gráfico representa os valores mínimo e máximo medidos, bem como os valores dos quartis e a mediana, onde se observa que há uma tendência geral de diminuição dos valores com o afastamento do ponto de lançamento (“*spigot*”). Esta tendência exibe variações ao longo da malha de amostragem, com destaque para a amostra situada a 5m, apresentando valores muito acima dos demais pontos.

Figura 117 – Representação dos dados estatísticos de densidade real dos grãos da Barragem Campo Grande.

O resumo dos dados estatísticos apresentados na Tabela 24 mostra os valores que definem o comportamento observado no gráfico da Figura 117, onde ocorrem variações dos valores de densidade real dos grãos entre as amostras, especialmente influenciados pela amostra 5m, com valor médio em torno de 3,626, mas com extremos em 4,422 e 3,290, máximo e mínimo respectivamente.

Tabela 24 – Dados estatísticos de densidade real dos grãos obtidos a partir da análise por picnômetro da Barragem Campo Grande.

	G									
<i>Densidade real à 20°C</i>	<i>0m</i>	<i>5m</i>	<i>10m</i>	<i>10mLD</i>	<i>10mLE</i>	<i>20m</i>	<i>20mLD</i>	<i>20mLE</i>	<i>40m</i>	<i>60m</i>
Média	3,675	4,345	3,886	3,531	3,497	3,615	3,434	3,469	3,481	3,331
Erro padrão	0,020	0,022	0,015	0,033	0,016	0,039	0,040	0,026	0,017	0,020
Mediana	3,678	4,345	3,890	3,531	3,504	3,611	3,472	3,490	3,478	3,318
Desvio padrão	0,035	0,066	0,036	0,057	0,027	0,067	0,069	0,046	0,042	0,049
Variância da amostra	0,0012	0,0044	0,0013	0,0033	0,0008	0,0045	0,0048	0,0021	0,0018	0,0024
Intervalo	0,070	0,190	0,107	0,115	0,053	0,134	0,122	0,083	0,116	0,136
Mínimo	3,638	4,232	3,830	3,473	3,467	3,550	3,354	3,417	3,426	3,290
Máximo	3,708	4,422	3,937	3,588	3,520	3,684	3,476	3,500	3,542	3,426
1o quartil	3,658	4,293	3,872	3,502	3,486	3,581	3,413	3,454	3,454	3,305
3o quartil	3,693	4,402	3,901	3,560	3,512	3,648	3,474	3,495	3,504	3,332

A representação em planta da densidade real dos grãos resultantes das análises pode ser observada na Figura 118.

Figura 118 – Representação em planta dos valores de densidade da Barragem Campo Grande.

A distribuição em planta demonstra notável padrão de deposição de grãos mais pesados nas porções proximais e centrais do ponto de lançamento (“*spigot*”). Este comportamento resulta na diminuição da densidade real dos grãos à medida que se afasta do ponto de lançamento, seja em direção a lagoa de decantação seja com o afastamento da linha central de amostragem.

5.4. *Limites de Liquidez e Plasticidade*

Como descrito em “4. *Materiais e Métodos*” os materiais foram submetidos a ensaios para determinação dos limites de liquidez e plasticidade.

Os limites de plasticidade e liquidez são função da presença e comportamento específico do argilomineral presente na amostra. Por isso quando da realização dos ensaios verificou-se que todos os materiais apresentavam grande concentração de areia fina e comportamento típico de solos arenosos, ou seja, materiais sem plasticidade.

Este comportamento se manifestou nas diversas tentativas de se moldar os materiais à concha padronizada do ensaio de limite de liquidez sem sucesso. Nas melhores distribuições o material deslizava pela concha ao iniciar a contagem de quedas, invalidando os preceitos da norma. Além disso, a elaboração de cilindros para determinação do limites de plasticidade era inviável, pois os materiais se fragmentavam antes de atingir os 3mm especificado em norma.

Apesar de ser possível determinar o Limite de Liquidez conhecendo-se uma só ponto, por meio da fórmula desenvolvida pela “*Federal Highway Administration*”, em nenhuma das tentativas obteve-se um valor confiável do número de golpes.

Assim todas as amostras coletadas nas praias de rejeitos das barragens B5 – Bunge, Doutor/ Circuito Timbopeba – CVRD e Campo Grande/ Circuito Alegria - CVRD podem ser classificadas como solos/sedimentos não plásticos.

5.5. *Análise de Forma*

5.5.1. **Análise Qualitativa**

Para entender as formas dos grãos e conseqüentemente os resultados obtidos na análise desenvolvida neste estudo é importante a observação prévia dos hábitos minerais, ou seja, a forma como o mineral se apresenta na natureza, de maneira mais comum. Esta observação permite identificar e entender com maior clareza os minerais e suas formas presentes nas amostras estudadas e observar as mudanças físicas e químicas do processo de beneficiamento.

Esta relação é possível, pois os minerais presentes nas praias de barragens de rejeitos são diferentes dos minerais presentes em solos, nos quais as formas originais já foram sensivelmente modificadas ao longo do tempo geológico, transformadas por processos intempéricos, erosivos e de transporte da rocha original. No caso dos materiais granulares originados do beneficiamento mineral, são guardadas relações com a forma original presente na rocha recém fragmentada.

Para ilustração desses hábitos, foram selecionadas algumas imagens que representam de maneira mais comum os minerais mais abundantes identificados nas amostras de estudo (Figuras 119 a 125). Estas formas (hábitos) são originalmente descritas e apresentadas no trabalho de V.M. Goldschmidt, *Atlas der Krystallformen*, 1913-1923 e disponível em Mindat (2007).

Evidentemente que deve ser considerado que estes hábitos apresentados ocorrem em condições ideais de crescimento e formação do mineral e, portanto, estão sujeitos a variações; porém servem como referência inicial da geometria provável a ser encontrada.

Estas figuras de hábitos cristalinos dos minerais podem ser comparadas às imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), técnica utilizada para analisar qualitativamente as formas e texturas dos grãos, apresentadas e discutidas a seguir.

Figura 119 – Ilustração dos hábitos comuns do mineral quartzo (SiO_2).

Figura 120 – Ilustração dos hábitos comuns do mineral hematita (Fe_2O_3).

Figura 121 – Ilustração dos hábitos comuns do mineral apatita utilizados para representar hidroxiapatita ($\text{Ca}_5[\text{OH}](\text{PO}_4)_3$).

Figura 122 – Ilustração de alguns hábitos do mineral ilmenita ($\text{Fe}^{2+}\text{TiO}_3$)

Figura 123 – Ilustração de hábitos comuns presentes no mineral magnetita ($\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$)

Figura 124 – Ilustração do hábito usualmente observado no grupo da clorita (fórmula geral - $A_56T_4O_{10}\cdot Z_8$, onde $A=\text{Al, Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Li, Mg, Mn, ou Ni}$, $T=\text{Al, Fe}^{3+}, \text{Si}$, ou combinados, e $Z=\text{O e/ou OH}$).

Figura 125 – Ilustração de hábitos comuns do mineral anatásio (TiO_2).

5.5.1.1. Amostra Barragem B5 - Bunge

Quando observadas em microscópio eletrônico de varredura, por meio de imagens de elétrons retro-espalhados, as amostras da barragem B5 apresentam predomínio de grãos de maior dimensão de quartzo, caracterizado por tons de cinza mais escuro, e grãos de menores dimensões de minerais do grupo da clorita, hidroxiapatita, hematita, magnetita, anatásio/rutilo, zircão, monazita, em tons de cinza mais claro (Figura 126 e 127).

Em todos estes minerais, como pode ser observado mais detalhadamente nas Figuras 128 e 130, são caracterizadas bordas afiadas, mostrando sinais de pequena abrasão com bordas e cantos arredondados em algumas extensões, denominados sub-angulosos (0,25-0,30), e aspecto textural superficial dos grãos picotado a estriado com fraturas conchoideais no quartzo. Diferenciam-se alguns minerais como quartzo e hematita/magnetita que sistematicamente apresentam-se com textural superficial intemperizada ou corroída, e suja por goethita. Nestes minerais com características especiais os grãos são sub-arredondados (0,4), apresentando abrasão, onde a forma original é evidente, entretanto as bordas e cantos são arredondados.

Figura 126 – Visão parcial de amostra da barragem B5 obtida em microscópio eletrônico de varredura mostrando variação de tamanhos e formas.

Figura 127 – Visão parcial de amostra da barragem B5 mostrando variação da tonalidade relacionada à composição mineralógica.

Figura 128 – Visão parcial de amostra da barragem B5 mostrando grãos sub-angulosos e textura superficial picotada.

Figura 129 – Visão parcial de amostra da barragem B5 mostrando grãos sub-angulosos a sub-arredondados, com textura superficial picotada a corroída/intemperizada.

As figuras revelam ainda esfericidade com valor em torno de 0,7 com grãos essencialmente esferoidais a aciculares, com algumas variações nos casos de minerais lamelares (grupo das cloritas), onde se descreve valores de 0,9 e, em minerais mais aciculares, como fragmentos de quartzo, hidroxiapatita, anatásio e hematita, com valor 0,5.

Figura 130 – Visão parcial de amostra da barragem B5 mostrando grãos sub-angulosos a sub-arredondados, com textura superficial picotada e por vezes, corroída/intemperizada com goethita.

5.5.1.2. Amostra Barragem Doutor/ Circuito Timbopeba – CVRD

A análise qualitativa de forma nas amostras da barragem de Doutor, realizada com as imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura, por meio de imagens de elétrons retro-espalhados, revela a presença de uma grande diferenciação granulométrica entre quartzo e hematita (Figura 131).

Quartzo, os grãos de maiores dimensões, é caracterizado por tons de cinza mais escuro, enquanto a hematita, grãos de menores dimensões, é revelada em tons de cinza mais claro (Figura 132 a 134).

Figura 131 – Visão parcial de amostra da barragem Doutor mostrando variação granulométrica relacionada à composição mineralógica (quartzo - tons de cinza escuro; hematita – tons de cinza claro).

Apesar da distinção granulométrica, em ambos os minerais são observadas pequenas abrasões nas bordas, com predomínio de cantos afiados, agrupando-os como sub-angulosos (0,25-0,30) a angulosos (0,2), com aspecto textural superficial dos grãos picotado a estriado e, grãos de quartzo, com freqüentes fraturas conchoidais, como pode ser observado em detalhe nas Figuras 132 a 134. Nestas amostras estão presentes, em pequena proporção, grãos com textura superficial intemperizada ou corroída, normalmente com uma superfície de goethita. Nestes minerais os grãos tendem a ser sub-arredondados (0,4), apresentando bordas e cantos arredondados.

As imagens obtidas demonstram esfericidade dos grãos variável entre 0,7, predominante, e 0,5, compostos por grãos essencialmente esferoidais a aciculares. Em menor proporção são observados grão de hematita com forma lamelar a discoidal (0,3 a 0,9).

Figura 132 – Visão parcial de amostra da barragem Doutor mostrando predomínio de grãos sub-angulosos, com textura superficial picotada e por vezes, corroída/intemperizada com goethita.

Figura 133 – Detalhe da Figura 132 onde se observa grãos sub-angulosos e sub-arredondados, com textura superficial picotada e corroída/intemperizada com goethita.

Figura 134 – Detalhe da Figura 132 com grãos sub-anguloso e textura superficial picotada a estriada.

5.5.1.3. Amostra Barragem Campo Grande/ Circuito Alegria - CVRD

As amostras da barragem de Campo Grande revelam, nas imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura, por meio de imagens de elétrons retroespalhados, a presença de, essencialmente, quartzo e hematita com similaridade de tamanho e diversas características de forma (Figura 135).

Pode-se observar em detalhe, nas Figuras 136 e 137, a diversidade de formas e texturas presentes nas amostras de Campo Grande. Nestas amostras os minerais são amplamente formados por grãos de bordas afiadas, com restrita abrasão das bordas, agrupando-os como angulosos (0,2) a sub-angulosos (0,25-0,30), com aspecto textural predominantemente, picotado, às vezes estriado.

São observadas ainda texturas superficiais intemperizadas ou corroídas a recobertas, usualmente com goethita. A alteração faz com que nestes minerais os grãos tendam a ser sub-arredondados (0,4), apresentando bordas e cantos arredondados.

Figura 135 – Visão parcial de amostra da barragem Campo Grande mostrando similaridade de tamanho entre os grãos de quartzo, tons de cinza escuro; e hematita/magnetita, tons de cinza claro.

Figura 136 – Detalhe da Figura 135 onde se observa grãos sub-angulosos e sub-arredondados, com textura superficial picotada e corroída/intemperizada com goethita.

As imagens obtidas demonstram grande variação da esfericidade, com grãos em sua maior parte esferoidais a aciculares, valor entre 0,7 e 0,5. Entretanto, é também presente hematita com forma lamelar, o que pode gerar valores de 0,9 a 0,3 em função do ângulo de observação.

Figura 137 – Detalhe da Figura 136 onde se observa grãos sub-angulosos e sub-arredondados, com textura superficial picotada e corroída/intemperizada com goethita e esfericidade variável.

5.5.2. Análise Quantitativa

A realização da análise quantitativa de forma dos grãos gerou inúmeros gráficos específicos para cada amostra analisada que foram condensados nas figuras e tabelas apresentadas a seguir. Os dados e informações de cada amostra estão apresentados no Apêndice B – Análise quantitativa da forma dos grãos.

5.5.2.1. Amostra Barragem B5 - Bunge

Os valores de relação de aspecto obtidos para as amostras da barragem B5 podem ser visualizados no gráfico do tipo “*boxplot*” da Figura 138. Neste gráfico observa-se a similaridade entre os valores medianos e quartis entre todas as amostras. A comparação entre a amostra mais próxima ao ponto de lançamento (B-0m) e aquela mais distante (B-40m) mostra a diferença dos valores máximos, com a diminuição da relação de aspecto na amostra situada a 40 metros.

Figura 138 – Representação dos dados estatísticos de relação de aspecto da Barragem B5.

O resumo dos dados estatísticos apresentados na Tabela 25 mostra os valores que definem o comportamento observado no gráfico da Figura 138, sem significativas variações dos valores médios e medianos de relação de aspecto, em torno de 1,36 e 1,22, respectivamente. Os valores máximos medidos estão situados, freqüentemente, abaixo de 10.

A representação em planta da relação de aspecto dos grãos pode ser observada na Figura 139.

Tabela 25 – Dados estatísticos de relação de aspecto obtidos a partir da análise de imagem das amostras da Barragem B5.

Dados estatísticos	B								
	0m	5m	10m	10mLD	10mLE	20m	20mLD	20mLE	40m
Média	1,35	1,38	1,40	1,38	1,34	1,36	1,35	1,36	1,36
Mediana	1,22	1,22	1,25	1,20	1,20	1,25	1,20	1,22	1,20
Mínimo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Máximo	17,49	7,60	7,60	32,00	10,00	8,50	9,00	17,00	7,60
1º quartil	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3º quartil	1,50	1,50	1,50	1,47	1,40	1,50	1,41	1,43	1,43
amplitude	16,49	6,60	6,60	31,00	9,00	7,50	8,00	16,00	6,60

Figura 139 – Representação em planta dos valores de relação de aspecto da Barragem B5.

A distribuição em planta demonstra concentração dos maiores valores na região próxima ao ponto de lançamento (“spigot”). Com exceção desta mancha na região proximal, os demais resultados determinam uma distribuição homogênea dos valores.

Na análise da esfericidade (Figura 140), observa-se que as amostras possuem similaridade em seus valores medianos e quartis. Os maiores valores se distribuem na região central da amostragem (10mLE e 20mLE), com similaridade entre os valores inicial (0m) e final (40m), não evidenciando tendência de diminuição ou aumento à medida que se afasta do “spigot” e caminha em direção à lagoa de decantação, ou seja, de 0m a 40m.

Figura 140 – Representação dos dados estatísticos de esfericidade da Barragem B5.

O padrão observado no gráfico da Figura 140 está exposto em dados estatísticos no quadro resumo (Tabela 26) que mostra pequenas variações dos valores médios e medianos de relação de aspecto, em torno de 0,78 e 0,77, respectivamente.

Assim, os resultados obtidos da barragem B5 permitem caracterizá-la como composta por grãos de formas retangulares ou alteres, descrita pela relação de aspecto (1,36), ou aciculares a esferoidais, definida pela esfericidade (0,78).

Tabela 26 – Dados estatísticos de esfericidade obtidos a partir da análise de imagem das amostras da Barragem B5.

Dados estatísticos	B								
	0m	5m	10m	10mLD	10mLE	20m	20mLD	20mLE	40m
Média	0,78	0,77	0,76	0,78	0,79	0,78	0,79	0,79	0,78
Mediana	0,77	0,75	0,75	0,76	0,80	0,76	0,78	0,80	0,76
Mínimo	0,02	0,01	0,00	0,00	0,03	0,03	0,00	0,02	0,04
Máximo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1º quartil	0,72	0,71	0,71	0,71	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
3º quartil	0,85	0,82	0,82	0,84	0,87	0,84	0,87	0,87	0,84
amplitude	0,98	0,99	1,00	1,00	0,97	0,97	1,00	0,98	0,96

Os valores de esfericidade podem ser observados na representação em planta da Figura 141.

Figura 141 – Representação em planta dos valores de esfericidade da Barragem B5.

A distribuição dos valores de esfericidade mostra concentração dos menores valores na região próxima ao ponto de lançamento (“*spigot*”). Exceto a mancha na região proximal central, os demais resultados determinam uma distribuição homogênea dos valores.

5.5.2.2. Amostra Barragem Doutor/ Circuito Timbopeba – CVRD

Nas amostras da barragem Doutor, apesar da similaridade dos valores medianos e quartis, é possível observar uma tendência de diminuição dos valores de relação de aspecto máximos entre as amostras, com quebra desta tendência na região de 20m. O comportamento dos valores de relação de aspecto obtidos é visualizado no gráfico do tipo “*boxplot*” da Figura 142.

Figura 142 – Representação dos dados estatísticos de relação de aspecto da Barragem Doutor.

O resumo dos dados estatísticos pode ser observado na Tabela 27.

Tabela 27 – Dados estatísticos de relação de aspecto obtidos a partir da análise de imagem das amostras da Barragem Doutor.

Dados estatísticos	D									
	0m	5m	10m	10mLD	10mLE	20m	20mLD	20mLE	40m	80m
Média	1,39	1,38	1,36	1,41	1,40	1,41	1,40	1,40	1,37	1,41
Mediana	1,25	1,24	1,22	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
Mínimo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Máximo	17,49	12,00	12,00	9,00	8,00	17,49	17,49	10,00	8,00	8,11
1º quartil	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3º quartil	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
amplitude	16,49	11,00	11,00	8,00	7,00	16,49	16,49	9,00	7,00	7,11

Os valores de relação de aspecto mostram pequenas variações dos valores médios e medianos, em torno de 1,39 e 1,25, respectivamente.

A representação em planta do valor médio da relação de aspecto dos grãos pode ser observada na Figura 143.

Figura 143 – Representação em planta dos valores de relação de aspecto da Barragem Doutor.

A distribuição em planta mostra concentração dos menores valores nas regiões próxima ao ponto de lançamento (“*spigot*”) e intermediária da amostragem (40m). Com exceção destas manchas, os demais resultados compõem uma distribuição homogênea dos valores.

A Figura 144 expressa os valores resultantes da análise da esfericidade, na qual se observa diminuição dos valores na região central de amostragem (10m a 20m) em relação àquelas mais próximas ao “*spigot*” (0m e 5m) e a uma mais distante (40m). Os valores da região central de amostragem se assemelham, em seus valores medianos e quartis, com a amostra mais distante (80m).

O resumo dos dados estatísticos apresentado na Tabela 28 mostra o comportamento observado no gráfico da Figura 144, no qual as variações da média e mediana de relação de aspecto ocorrem em torno de 0,77 e 0,76, respectivamente.

Figura 144 – Representação dos dados estatísticos de esfericidade da Barragem Doutor.

Tabela 28 – Dados estatísticos de esfericidade obtidos a partir da análise de imagem das amostras da Barragem Doutor.

Dados estatísticos	D									
	0m	5m	10m	10mLD	10mLE	20m	20mLD	20mLE	40m	80m
Média	0,77	0,77	0,79	0,75	0,76	0,75	0,76	0,77	0,78	0,75
Mediana	0,76	0,76	0,78	0,75	0,75	0,75	0,75	0,76	0,76	0,75
Mínimo	0,09	0,01	0,02	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Máximo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1o quartil	0,71	0,71	0,72	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,72	0,71
3o quartil	0,83	0,84	0,86	0,81	0,82	0,81	0,82	0,84	0,85	0,81
amplitude	0,91	0,99	0,98	0,97	0,97	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99

As amostras da barragem Doutor são compostas por grãos de formas retangulares ou alteres, descrita pela relação de aspecto (1,39), ou aciculares a esferoidais, definida pela esfericidade (0,77).

Os valores médios de esfericidade podem ser observados na representação em planta da Figura 145. A distribuição dos valores de esfericidade é irregular, com concentrações dos maiores valores na porção próxima ao ponto de lançamento (“spigot”) e centro da amostragem (40m). Assim, os valores medidos distribuem-se de maneira homogênea ao longo de toda a região representada.

Figura 145 – Representação em planta dos valores de esfericidade da Barragem Doutor.

5.5.2.3. Amostra Barragem Campo Grande/ Circuito Alegria - CVRD

Nas amostras da barragem Campo Grande os valores de relação de aspecto são maiores nas amostras 0m, 5m, 10m, e 20mLD, quando comparados às demais. Esta pequena diferença dos valores medianos e quartis pode ser descrita como uma suave tendência de diminuição dos valores à medida que se afasta do ponto de lançamento (0m). O comportamento dos valores de relação de aspecto obtidos é visualizado no gráfico do tipo “*boxplot*” da Figura 146.

Figura 146 – Representação dos dados estatísticos de relação de aspecto da Barragem Campo Grande.

Os dados estatísticos apresentados na Tabela 29 mostram a tendência exposta no gráfico da Figura 146. Esta tendência é expressa por pequenas variações dos valores médios e medianos de relação de aspecto em torno de 1,38 e 1,25, respectivamente, e pelos valores de 1º quartil, de 1,0 a 1,06.

Tabela 29 – Dados estatísticos de relação de aspecto obtidos a partir da análise de imagem das amostras da Barragem Campo Grande.

	G									
Dados estatísticos	0m	5m	10m	10mLD	10mLE	20m	20mLD	20mLE	40m	60m
Média	1,38	1,39	1,39	1,37	1,39	1,39	1,36	1,36	1,37	1,37
Mediana	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
Mínimo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Máximo	9,00	14,09	17,49	10,00	8,00	8,00	17,00	7,00	11,00	11,00
1o quartil	1,05	1,06	1,05	1,00	1,00	1,00	1,03	1,00	1,00	1,00
3o quartil	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
amplitude	8,00	13,09	16,49	9,00	7,00	7,00	16,00	6,00	10,00	10,00

A representação em planta dos valores médios da relação de aspecto dos grãos da barragem de Campo Grande pode ser observada na Figura 147.

Figura 147 – Representação em planta dos valores de relação de aspecto da Barragem Campo Grande.

A distribuição em planta demonstra concentração dos maiores valores na região próxima ao ponto de lançamento (“*spigot*”). À medida que se afasta do ponto de lançamento (“*spigot*”) e da linha central de amostragem, os valores se tornam menores.

Os valores resultantes da análise da esfericidade, como apresentado na Figura 148, expressam uma suave diminuição da amostra próxima ao ponto de lançamento até aquelas de 10m e 20m, para posterior aumento até a última coletada (G-60m).

De modo geral, como apresentado no quadro resumo dos dados estatísticos (Tabela 30), os valores de média e mediana de relação de aspecto ocorrem em torno de 0,79 e 0,78, respectivamente. As maiores diferenças ocorrem nos valores de 3º quartil, de 0,88 a 0,83.

Os valores obtidos para as amostras da barragem Campo Grande definem grãos de formas retangulares ou alteres, descrita pela relação de aspecto (1,38), ou esferoidais a aciculares, definida pela esfericidade (0,79).

Figura 148 – Representação dos dados estatísticos de relação de aspecto da Barragem Campo Grande.

Tabela 30 – Dados estatísticos de esfericidade obtidos a partir da análise de imagem das amostras da Barragem Campo Grande.

Dados estatísticos	G									
	0m	5m	10m	10mLD	10mLE	20m	20mLD	20mLE	40m	60m
Média	0,80	0,78	0,79	0,79	0,77	0,77	0,80	0,78	0,79	0,80
Mediana	0,80	0,78	0,79	0,78	0,76	0,76	0,80	0,78	0,79	0,80
Mínimo	0,02	0,01	0,01	0,04	0,05	0,05	0,01	0,01	0,01	0,05
Máximo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1o quartil	0,72	0,72	0,72	0,72	0,71	0,71	0,73	0,72	0,72	0,72
3o quartil	0,88	0,85	0,87	0,86	0,83	0,83	0,88	0,85	0,87	0,87
Amplitude	0,98	0,99	0,99	0,96	0,95	0,95	0,99	0,99	0,99	0,95

Os valores médios de esfericidade podem ser observados na representação em planta da Figura 149. A distribuição em planta mostra concentração dos menores valores na região proximal e a esquerda do ponto de lançamento (“spigot”). À medida que se afastam do ponto de lançamento (“spigot”) e a direita da linha central de amostragem, os valores se tornam maiores.

Figura 149 – Representação em planta dos valores de esfericidade da Barragem B5.

5.6. Simulação Hidráulica Aplicada a Rejeitos de Mineração

5.6.1. Análise granulométrica

As curvas granulométricas de frequência acumulada obtidas em granulômetro a laser (Figura 150) revelam, para a barragem B5, decrescência granulométrica entre as amostras 0cm e 40cm, e granocrescência em relação às demais, à medida que se aproxima do equivalente à lagoa de decantação (120cm). Destaca-se que a amostra de 20cm não foi analisada em virtude da repetição de ensaios e conseqüente perda de massa, inviabilizando a realização da granulometria a laser.

As curvas observadas permitem classificar todas as amostras como areia média a fina, pouco siltosa.

Figura 150 – Análise granulométrica por granulômetro a laser das amostras de simulação da Barragem B5.

O resumo estatístico apresentado na Tabela 31 apresenta o comportamento descrito na curva de frequência acumulada, na qual as amostras têm D_{50} situados entre 0,123mm e 0,327mm.

Tabela 31– Dados estatísticos obtidos a partir da análise granulométrica por granulômetro a laser nas amostras da simulação da Barragem B5.

Dados estatísticos	0cm	20cm	40cm	70cm	120cm
D₁₀	0,043	*	0,041	0,054	0,058
D₃₀	0,091	*	0,079	0,133	0,171
Mediana (D₅₀)	0,146	*	0,123	0,214	0,327
D₆₀	0,160	*	0,133	0,235	0,359
D₉₀	0,295	*	0,234	0,435	0,727
Mínimo	0,000	*	0,000	0,000	0,000
Máximo	0,556	*	0,409	0,754	1,619
1º quartil	0,080	*	0,070	0,115	0,138
3º quartil	0,204	*	0,167	0,299	0,474
CU	4	*	3	4	6
CC	1	*	1	1	1

* amostra não ensaiada por granulômetro a laser

Na análise de coeficiente de uniformidade (CU) as amostras apresentam valores entre 3 e 6, classificando-as como muito uniforme ($CU < 5$) a uniformidade média ($5 < CU < 15$). Com relação ao coeficiente de curvatura (CC), todas as amostras estão no limite inferior do intervalo de classificação bem graduada ($1 < CC < 3$).

Os dados estatísticos obtidos para as amostras da barragem Campo Grande são apresentados no gráfico do tipo “*boxplot*” da Figura 151, com os valores mínimo e máximo da análise granulométrica, bem como os valores dos quartis e a mediana. Neste gráfico, nota-se a variação dos valores medianos e quartis, onde há uma tendência de aumento à medida que se afasta do ponto de lançamento e caminha em direção ao equivalente à lagoa de decantação, ou seja, de 0cm a 120cm.

Com a análise das curvas granulométricas de frequência acumulada obtidas em análise de imagem para as amostras de simulação da barragem B5 (Figura 152), observa-se decrescência granulométrica entre as amostras 0cm e 20cm, para posterior granocrescência, à medida que se aproxima do equivalente à lagoa de decantação (120cm).

As curvas observadas permitem classificar todas as amostras como areia média a fina.

* amostra 20cm não ensaiada por granulômetro a laser

Figura 151 – Representação dos dados estatísticos resultantes da análise granulométrica por granulômetro a laser das amostras de simulação da Barragem B5.

Figura 152 – Análise granulométrica por análise de imagem das amostras de simulação da Barragem B5.

Os dados estatísticos obtidos (Tabela 32) confirmam o comportamento da curva de frequência acumulada, onde as amostras têm D_{50} entre 0,109mm e 0,270mm.

Na análise de coeficiente de uniformidade (CU) as amostras apresentam valores entre 2 e 4, classificando-as como muito uniforme ($CU < 5$). Em relação ao coeficiente de curvatura (CC), todas as amostras estão no limite inferior do intervalo de classificação bem graduada ($1 < CC < 3$).

Tabela 32– Dados estatísticos obtidos a partir da análise granulométrica por análise de imagem nas amostras da simulação da Barragem B5.

Dados estatísticos	0cm	20cm	40cm	70cm	120cm
D₁₀	0,069	0,054	0,065	0,089	0,081
D₃₀	0,115	0,082	0,105	0,156	0,173
Mediana (D₅₀)	0,162	0,109	0,143	0,220	0,270
D₆₀	0,182	0,120	0,158	0,246	0,310
D₉₀	0,310	0,187	0,243	0,418	0,542
Mínimo	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
Máximo	0,765	0,384	0,454	0,883	0,907
1º quartil	0,107	0,078	0,098	0,144	0,153
3º quartil	0,230	0,147	0,193	0,311	0,401
CU	3	2	2	3	4
CC	1	1	1	1	1

Os dados estatísticos obtidos em análise granulométrica por análise de imagem para as amostras da simulação da barragem B5 são apresentados no gráfico do tipo “*boxplot*” da Figura 153. O gráfico mostra a variação dos valores medianos e quartis, com tendência de aumento dos valores à medida que se afasta do ponto de lançamento e caminha em direção ao equivalente à lagoa de decantação, ou seja, de 0cm a 120cm.

Figura 153 – Representação dos dados estatísticos resultantes da análise granulométrica por análise de imagem das amostras de simulação da Barragem B5.

As curvas granulométricas de frequência acumulada obtidas em granulômetro a laser para as amostras de simulação da barragem Campo Grande (Figura 154), revelam decrescência granulométrica entre as amostras 0cm e 20cm, para posterior granocrescência, à medida que se afasta do ponto de lançamento e se aproxima do equivalente à lagoa de decantação, situada a 100cm.

As curvas geradas permitem classificar todas as amostras como areia média a fina.

Os dados estatísticos obtidos (Tabela 33) demonstram o comportamento da curva de frequência acumulada, no qual as amostras têm D_{50} situados entre 0,144mm e 0,276mm.

Os valores de coeficiente de uniformidade (CU) das amostras variam entre 3 e 4, classificando-as como muito uniforme ($CU < 5$). Em relação ao coeficiente de curvatura (CC), todas as amostras estão no limite inferior do intervalo de classificação bem graduada ($1 < CC < 3$).

Figura 154 – Análise granulométrica por granulômetro a laser das amostras de simulação da Barragem Campo Grande.

Tabela 33 – Dados estatísticos obtidos a partir da análise granulométrica por granulômetro a laser nas amostras da simulação da Barragem Campo Grande.

Dados estatísticos	0cm	20cm	40cm	75cm	100cm
D₁₀	0,065	0,044	0,072	0,100	0,113
D₃₀	0,13	0,08	0,14	0,16	0,19
Mediana (D₅₀)	0,218	0,144	0,236	0,242	0,276
D₆₀	0,25	0,17	0,27	0,26	0,30
D₉₀	0,539	0,459	0,577	0,485	0,536
Mínimo	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Máximo	1,193	1,389	1,193	1,024	1,024
1º quartil	0,112	0,073	0,123	0,146	0,167
3º quartil	0,343	0,249	0,370	0,331	0,371
CU	4	4	4	3	3
CC	1	1	1	1	1

Os resultados dos dados estatísticos obtidos nas amostras da simulação da barragem Campo Grande são apresentados no gráfico do tipo “boxplot” da Figura 155. O gráfico demonstra a variação dos valores medianos e quartis, e a suave tendência de aumento à medida que se afasta do ponto de lançamento e se aproxima do equivalente à lagoa de decantação, ou seja, de 0cm a 100cm.

Figura 155 – Representação dos dados estatísticos resultantes da análise granulométrica por granulômetro a laser das amostras de simulação da Barragem Campo Grande.

As amostras de simulação da barragem de Campo Grande apresentam, quando analisadas em curvas granulométricas de frequência acumulada obtidas em análise de imagem (Figura 156), decrescência granulométrica entre as amostras 0cm e 20cm, para posterior granocrescência, à medida que se afasta do ponto de lançamento e se aproxima do equivalente à lagoa de decantação, situada a 100cm.

As curvas de frequência acumulada permitem classificar todas as amostras como areia média a fina.

Os dados estatísticos obtidos (Tabela 34) evidenciam o comportamento descrito na curva de frequência acumulada, no qual as amostras têm D_{50} variáveis entre 0,139mm e 0,241mm.

Os valores de coeficiente de uniformidade (CU) das amostras variam entre 2 e 3, classificando-as como muito uniforme ($CU < 5$). Os valores de coeficiente de curvatura (CC) de todas as amostras estão no limite inferior do intervalo de classificação bem graduada ($1 < CC < 3$).

Figura 156 – Análise granulométrica por análise de imagem das amostras de simulação da Barragem Campo Grande.

Tabela 34 – Dados estatísticos obtidos a partir da análise granulométrica por análise de imagem nas amostras da simulação da Barragem Campo Grande.

Dados estatísticos	0cm	20cm	40cm	75cm	100cm
D ₁₀	0,080	0,064	0,084	0,116	0,087
D ₃₀	0,131	0,101	0,106	0,181	0,166
Mediana (D ₅₀)	0,182	0,139	0,190	0,241	0,231
D ₆₀	0,203	0,154	0,210	0,264	0,255
D ₉₀	0,330	0,247	0,329	0,412	0,396
Mínimo	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
Máximo	0,722	0,895	0,683	0,757	0,767
1º quartil	0,122	0,094	0,130	0,170	0,153
3º quartil	0,255	0,191	0,259	0,325	0,312
CU	3	2	2	2	3
CC	1	1	1	1	1

Os dados estatísticos de granulometria obtidos na análise de imagem das amostras da simulação da barragem Campo Grande são apresentados no gráfico tipo “boxplot” da Figura 157. O gráfico mostra a variação dos valores medianos e quartis, e a tendência de aumento dos valores à medida que se afasta do ponto de lançamento e caminha em direção ao equivalente à lagoa de decantação, ou seja, de 0cm a 100cm.

Figura 157 – Representação dos dados estatísticos resultantes da análise granulométrica por análise de imagem das amostras de simulação da Barragem Campo Grande.

5.6.2. Análise de forma

Na análise da forma dos grãos das amostras de simulação os valores de relação de aspecto obtidos para as amostras da barragem B5 podem ser visualizados no gráfico do tipo “*boxplot*” da Figura 158. Neste gráfico observa-se a similaridade entre os valores medianos e quartis entre todas as amostras. A comparação entre a amostra mais próxima ao ponto de lançamento (0cm) e àquela mais distante (120cm) mostra apenas uma diferença entre os valores do 3º quartil, com aumento do valor deste parâmetro na amostra situada a 120cm.

O resumo estatístico apresentado na Tabela 35 mostra os valores que definem o comportamento observado no gráfico da Figura 158, onde não se observam significativas variações dos valores médios e medianos de relação de aspecto, em torno de 1,36 e de 1,21, respectivamente. Os valores máximos medidos estão situados freqüentemente abaixo de 10, especialmente a partir de 40cm.

Figura 158 – Representação dos dados estatísticos de relação de aspecto obtidos nas amostras de simulação da Barragem B5.

Tabela 35 – Dados estatísticos da relação de aspecto obtidos nas amostras da simulação da Barragem B5.

Dados estatísticos	0cm	20cm	40cm	70cm	120cm
Média	1,35	1,34	1,33	1,36	1,43
Mediana	1,20	1,20	1,20	1,20	1,25
Mínimo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Máximo	15,00	17,49	10,00	7,00	8,00
1o quartil	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3o quartil	1,44	1,40	1,40	1,43	1,50
amplitude	14,00	16,49	9,00	6,00	7,00

Na análise da esfericidade (Figura 159) observa-se a distribuição dos maiores valores na região próxima ao ponto de lançamento, 0cm a 40cm, e diminuem em direção à lagoa de decantação, evidenciando tendência de diminuição dos valores à medida que se afasta do “spigot”, ou seja, de 0cm a 120cm.

O padrão descrito no gráfico da Figura 159 pode ser visualizado em dados estatísticos no quadro resumo da Tabela 36. que mostra variações dos valores médios e medianos de relação de aspecto entre 0,80 e 0,75.

Figura 159 – Representação dos dados estatísticos resultantes da esfericidade obtidos nas amostras de simulação da Barragem B5.

Tabela 36 – Dados estatísticos da esfericidade obtidos nas amostras da simulação da Barragem B5.

Dados estatísticos	0cm	20cm	40cm	70cm	120cm
Média	0,79	0,80	0,80	0,78	0,75
Mediana	0,79	0,80	0,80	0,76	0,75
Mínimo	0,02	0,01	0,04	0,13	0,02
Máximo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1o quartil	0,72	0,73	0,72	0,72	0,71
3o quartil	0,87	0,88	0,88	0,85	0,80
amplitude	0,98	0,99	0,96	0,87	0,98

Os resultados obtidos na simulação da barragem B5 permitem classificá-la como composta por grãos de formas retangulares ou alteres, descrita pela relação de aspecto (1,36), ou aciculares a esferoidais, definida pela esfericidade (0,80 a 0,75).

Os valores de relação de aspecto obtidos para as amostras de simulação da barragem Campo Grande são visualizados no gráfico do tipo “boxplot” da Figura 160. Neste gráfico é possível observar a similaridade entre os valores medianos e quartis das amostras, destacando-se aquelas situadas até 75cm do ponto de lançamento. A partir deste ponto os valores resultantes são menores para a amostra mais distante (100cm). Os valores máximos medidos estão situados freqüentemente abaixo de 10.

Figura 160 – Representação dos dados estatísticos de relação de aspecto obtidos nas amostras de simulação da Barragem Campo Grande.

O resumo estatístico apresentado na Tabela 37 mostra os valores que descrevem o comportamento observado no gráfico da Figura 160, onde há pequenas variações dos valores médios de relação de aspecto em torno de 1,38, e maior variação do valor de 1º quartil, entre 1,00 e 1,08.

Tabela 37 – Dados estatísticos da relação de aspecto obtidos nas amostras da simulação da Barragem Campo Grande.

Dados estatísticos	0cm	20cm	40cm	75cm	100cm
Média	1,36	1,38	1,38	1,38	1,40
Mediana	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
Mínimo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Máximo	17,00	9,00	11,00	11,00	10,00
1o quartil	1,08	1,06	1,06	1,05	1,00
3o quartil	1,46	1,50	1,50	1,50	1,50
amplitude	16,00	8,00	10,00	10,00	9,00

As amostras revelam, na análise da esfericidade (Figura 161) gradativa e suave diminuição dos valores da região próxima ao ponto de lançamento em direção à lagoa de decantação, 0cm a 100cm.

O padrão descrito no gráfico da Figura 161 é confirmado em dados estatísticos no quadro resumo da Tabela 38, onde há variações dos valores médios e medianos de relação de aspecto de 0,81 a 0,77 para média e de 0,81 a 0,75 para mediana.

Figura 161 – Representação dos dados estatísticos resultantes da esfericidade obtidos nas amostras de simulação da Barragem Campo Grande.

Tabela 38– Dados estatísticos da esfericidade obtidos nas amostras da simulação da Barragem Campo Grande.

<i>Dados estatísticos</i>	0cm	20cm	40cm	75cm	100cm
Média	0,81	0,80	0,80	0,80	0,77
Mediana	0,81	0,80	0,80	0,80	0,75
Mínimo	0,00	0,01	0,03	0,00	0,01
Máximo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1o quartil	0,74	0,72	0,72	0,72	0,71
3o quartil	0,90	0,88	0,88	0,89	0,83
amplitude	1,00	0,99	0,97	1,00	0,99

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo estão apresentadas as discussões dos resultados das análises laboratoriais e dos ensaios de simulação realizados neste trabalho. Para a melhor compreensão do comportamento geral dos dados e identificação de suas características distintivas, os resultados são agrupados segundo os parâmetros analisados.

As técnicas de análises mineralógicas e químicas realizadas se mostram complementares e essenciais para o conhecimento básico das amostras. Estas análises revelam para a barragem B5 a presença de quartzo, hidroxiapatita, diopsídio e minerais do grupo da clorita e, em menor quantidade, anatásio, ilmenita, hematita, magnesioferrita, magnetita, goethita e goiazita. As barragens Doutor e Campo Grande são constituídas essencialmente por quartzo, hematita e secundariamente, goethita. A barragem de Campo Grande apresenta pequenas quantidades de magnetita.

As análises granulométricas realizadas, utilizando diferentes técnicas, revelam que, em função da técnica adotada (granulômetro a laser, peneiramento a úmido e análise de imagem), os valores variam entre si. Esta variação ocorre, normalmente, da seguinte forma: maiores valores na análise por granulômetro a laser (D_v), menores no peneiramento a úmido (D_s) e intermediários por análise de imagem (D_{av}) como apresentado na Figura 162. É fundamental observar e entender a característica que define diferentes valores segundo a metodologia adotada, pois os dados obtidos podem indicar diferentes comportamentos, tais como os parâmetros ressaltados ao longo da apresentação do capítulo “5. Resultados”: D_{50} , CU e condutividade hidráulica estimada (k estimado).

Para que esta variação dos valores de D_{50} seja melhor visualizada segue abaixo um resumo dos dados obtidos nas barragens:

- B5: 0,084 a 0,156mm (D_v), 0,053 a 0,093 (D_s) e 0,107 a 0,154mm (D_{av});
- Doutor: 0,051 a 0,114mm (D_v), 0,036 a 0,074 (D_s) e 0,095 a 0,143mm (D_{av});
- Campo Grande: 0,075 a 0,337mm (D_v), 0,050 a 0,127 (D_s) e 0,113 a 0,168mm (D_{av}).

Figura 162 – Representação dos dados de granulometria (D_{50}) das amostras analisadas ao longo da praia de rejeitos.

Notadamente na barragem Campo Grande os valores variam significativamente entre as amostras, resultando na classificação de areia média a areia fina siltosa. No caso das amostras da barragem Doutor, em que os diâmetros médios são menores, estas são classificadas como areia fina siltosa a silte arenoso. As amostras da barragem B5 são mais uniformes e assim são classificadas como areia fina pouco siltosa a siltosa. A ocorrência destas faixas granulométricas explica a inexequibilidade dos ensaios de limites de liquidez e plasticidade nas amostras coletadas, caracterizando-as com não plásticas.

Considerando essencialmente a granulometria das amostras e as estruturas sedimentares planares observadas (Figura 163), mas também respeitando as diferenças de densidades entre as fases minerais presentes, os escoamentos ao longo das praias de rejeitos podem ser classificados como transicionais entre subcríticos para $Fr < 1$ (inferior) e supercríticos para valores de $Fr > 1$ (superior).

Esta condição limite entre os limites de fluxo também está presente na avaliação do equilíbrio de sedimentação (deposição) e transporte. Como Küpper (1991) já relatou na análise de praias de rejeitos, é marcante a presença de uma superfície com contornos erodíveis. Assim, observa-se que a condição de sedimentação é governada por canais meandantes efêmeros (canais migratórios) que se movimentam continuamente sobre a superfície. Esses canais transportam e depositam o sedimento essencialmente como carga de fundo e são governados pela evolução / variação do fluxo.

Apesar das diferenças de valores de granulometria, o comportamento geral das amostras ao longo da praia de rejeitos é semelhante, principalmente quando comparado às distribuições de D_s e D_v (Figura 162). Os dados, quando observados individualmente para cada barragem estudada (capítulo “5. Resultados”), mostram comportamento irregular e variável. Entretanto, quando os mesmos são agrupados, nota-se uma tendência geral de diminuição do valor de D_{50} à medida que se distancia do ponto de lançamento, principalmente nas amostras de rejeitos do processamento de minérios de ferro das barragens de Doutor e Campo Grande.

Os diâmetros obtidos com as técnicas de granulômetro a laser e peneiramento a úmido, revelam coeficiente de uniformidade (CU) entre 4 e 5 para as amostras da barragem B5 (muito uniforme a uniformidade média), 3 a 8 da barragem Doutor (muito uniforme a uniformidade média) e 5 a 8 da barragem Campo Grande

(uniformidade média). Em todas as amostras, utilizando dados de análise de imagem, os valores ficaram abaixo de 5, classificando-as como muito uniforme.

Figura 163 – Fotografia da estrutura sedimentar plano paralela presente ao longo das praias de rejeitos.

A partir dos valores de D_{10} , obtidos por análise em granulômetro a laser e peneiramento a úmido, foi feita a estimativa de condutividade hidráulica (k), resultando em valores entre 10^{-3} e 10^{-4} cm/s na barragem B5, 10^{-4} e 10^{-5} cm/s na barragem Doutor e 10^{-3} e 10^{-4} cm/s na barragem Campo Grande. Os valores obtidos com a análise de imagem são maiores e constantes em torno de 10^{-3} cm/s em todas as amostras das diferentes barragens analisadas. Os valores estimados de k são coerentes com a caracterização granulométrica do material e tabela de referência (Tabela 39), inclusive no caso da barragem B5, onde são medidos em campo valores entre 10^{-3} e 10^{-4} cm/s (Bittar, 2006), mostrando a validade da fórmula de Hazen na estimativa da permeabilidade de maneira satisfatória para as praias de barragens de rejeitos.

Tabela 39 – Valores estimados da permeabilidade em função da granulometria do solo.

K (cm/s)	10^2	1	10^{-2}	10^{-4}	10^{-6}	10^{-8}
SOLO	Pedregulhos		Areias	Areias finas siltosas e argilosas, siltes argilosos		Argilas

Fonte: ABGE, 1996

O comportamento dos valores médios de densidade real é bastante irregular, variável dentro do conjunto de amostras em uma mesma barragem, especialmente no caso das barragens B5 e Doutor. Nessas barragens, estes valores não seguem um padrão ou tendência quando comparados à distância do ponto de lançamento (Figura 164) e são coerentes com suas constituições mineralógicas identificadas. Por outro lado, os valores médios de densidade real da barragem Campo Grande seguem nítida tendência de decréscimo à medida que se aproxima da lagoa de decantação (porção distal), mostrando possíveis mudanças nas proporções de seus constituintes mineralógicos.

Figura 164 – Representação dos dados de densidade real dos grãos nas amostras analisadas ao longo da praia de rejeitos.

A análise qualitativa da forma dos grãos revela valores de esfericidade para todas as amostras em torno de 0,7 com grãos essencialmente esferoidais a aciculares. Algumas variações ocorrem nos casos de minerais lamelares (principalmente grupo das cloritas e hematita), onde a esfericidade varia de 0,9 a 0,3, e minerais mais aciculares como fragmentos de quartzo, hidroxiapatita, anatásio e hematita, com esfericidade perto de 0,5.

Em todas as amostras os minerais são amplamente formados por grãos de bordas afiadas, com restrita abrasão, sendo agrupados como angulosos (0,2) a sub-

angulosos (0,25-0,30), com aspecto textural predominantemente picotado, às vezes estriado. São observadas ainda texturas superficiais intemperizadas ou corroídas a recobertas, usualmente com a formação de película superficial de goethita. A alteração faz com que nestes minerais os grãos tendam a ser sub-arredondados (0,4), apresentando bordas e cantos arredondados.

As características de forma dos grãos observadas qualitativamente, sem rigor estatístico, foram complementadas por dados de análise de imagem de modo dinâmico. Os resultados obtidos são agrupados por relação de aspecto e esfericidade (Figura 165 e 166).

O comportamento irregular em torno de um valor médio nos dados de relação de aspecto e esfericidade evidencia a uniformidade das amostras segundo a forma dos grãos ao longo das praias de rejeito nas barragens estudadas. Algumas variações pontuais podem ocorrer, mas sem clara relação com a distância do ponto de lançamento (*“spigot”*).

Figura 165 – Representação dos dados de relação de aspecto nas amostras analisadas ao longo da praia de rejeitos.

Figura 166 – Representação dos dados de esfericidade nas amostras analisadas ao longo da praia de rejeitos.

Quando os parâmetros são analisados aos pares, independentemente do afastamento da amostra em relação ao ponto de lançamento, alguns comportamentos podem ser destacados.

Tendo em vista que os princípios básicos de separação gravítica consideram, fundamentalmente, os parâmetros tamanho e densidade dos grãos, no caso de uma separação por queda impedida (ou retardada) com movimento de uma partícula em uma polpa, pode-se calcular a velocidade de sedimentação pela expressão:

$$V = k [D^*(ds-dp)]^{1/2} \quad (10)$$

onde: k = constante; D = diâmetro da partícula; ds = densidade de partícula e dp = densidade de polpa.

Assumindo que não há variações na densidade da polpa, a velocidade de sedimentação nos pontos amostrados pode ser estimada em termos relativos, utilizando-se os valores de granulometria obtidos em análises por granulômetro a laser e peneiramento a úmido (Figuras 167 e 168). A distribuição dos pontos demonstra tendência de diminuição das velocidades de sedimentação estimadas à medida que se afasta do ponto de lançamento (0m), notadamente nas barragens de Doutor e Campo Grande, compatíveis com a consideração de simplificação da

expressão. No caso da barragem B5 os valores tendem a ficar constantes, este padrão pode ser explicado pelas descargas sem ciclonagem descritas anteriormente, as quais devem mudar a densidade da polpa e, portanto, alterar as velocidades de sedimentação.

Figura 167 – Velocidade de sedimentação estimada nas amostras considerando diâmetro (D_{50}) obtido em granulômetro a laser (D_v).

Figura 168 – Velocidade de sedimentação estimada nas amostras considerando diâmetro (D_{50}) obtido em peneiramento a úmido (D_s).

Na análise da relação da densidade real com o tamanho das partículas, medido por granulômetro a laser (D_v) e peneiramento a úmido (D_s) (Figuras 169 e 170), verifica-se que os valores se distribuem de maneira irregular. Entretanto, utilizando-se linhas com mesma propriedade hidrodinâmica (velocidade de deslocamento - isocinéticas) de modelos já testados e utilizados em processos de beneficiamento mineral, nota-se a relação da distribuição das partículas com diferentes velocidades de transporte. Este padrão comprova as variações de fluxo ao longo das praias e, conseqüentemente, dos diâmetros e densidades das partículas que se depositam. Deste modo, o aterro hidráulico da barragem B5 segue um padrão de deposição de partículas de aproximadamente mesmo tamanho e densidade com fluxo constante. A barragem Doutor apresenta pequenas variações na velocidade, densidade e tamanho das partículas ao longo da praia. A barragem Campo Grande mostra as maiores variações na velocidade do transporte, tamanho e densidade ao longo da praia.

Destaca-se que tais constatações possuem limitação temporal, uma vez que as amostras estudadas correspondem a uma pequena parcela do aterro, representada pela fina camada de material amostrado.

Figura 169 – Combinação dos dados de densidade real dos grãos, tamanho dos grãos (D_v) e linhas isocinéticas.

Figura 170 – Combinação dos dados de densidade real dos grãos, tamanho dos grãos (D_s) e linhas isocinéticas.

Os dados obtidos por análise de imagem expressam menores variações de densidade e diâmetro (D_{av}) possivelmente retratando as características desta técnica empregada (Figura 171).

Figura 171 – Combinação dos dados de densidade real dos grãos, tamanho dos grãos (D_{av}) e linhas isocinéticas.

A comparação entre densidade real dos grãos e relação de aspecto evidencia ausência de correlação quando analisados para todas as amostras (Figura 172). Contudo, os dados das barragens de Doutor e Campo Grande sugerem uma tendência de aumento dos valores de relação de aspecto com a densidade.

Figura 172 – Correlação dos dados de densidade real dos grãos com a relação de aspecto das amostras.

A distribuição dos dados de esfericidade e densidade real na barragem B5 ocorre de maneira irregular, com ausência de correlação (Figura 173). Por outro lado, os dados das barragens de Doutor e Campo Grande indicam uma tendência de diminuição dos valores de esfericidade combinados com o aumento da densidade real dos grãos dentro do mesmo grupo de amostras.

Os dois padrões observados indicam a presença de grãos mais densos com pequeno aumento da relação de aspecto e maior esfericidade nas amostras da barragem Campo Grande. Na barragem Doutor os grãos mais pesados contribuem com o aumento da relação de aspecto e diminuição da esfericidade. Esta constatação sugere a contribuição de grãos mais cúbicos a prismáticos de hematita e magnetita nas amostras de Campo Grande e diferentemente, nas amostras de Doutor, os grãos de hematita tendem a contribuir com formas mais lamelares a discoidais.

Figura 173 – Correlação dos dados de densidade real dos grãos com a esfericidade das amostras.

O conjunto dos resultados obtidos neste estudo demonstra homogeneidade na distribuição dos grãos da barragem B5 ao longo da praia para o trecho analisado (Figura 174). Explica-se esta homogeneidade pela constância nos valores de CU, entre 4 e 5 (muito uniforme), por pequenas diferenças nos valores de granulometria, e também pelas pequenas diferenças de densidade dadas pela diversidade dos minerais constituintes das amostras. Os dados de forma dos grãos permanecem constantes ao longo da praia, composta por rejeitos sub-angulares (0,3), esferoidais a aciculares (0,78) e, secundariamente, por partículas lamelares.

Figura 174 – Perfil longitudinal esquemático do padrão da distribuição dos grãos ao longo da praia de rejeitos da barragem B5.

As características da barragem Doutor evidenciam suave tendência de diminuição da granulometria em direção à lagoa de decantação, acompanhada pelo pequeno aumento dos valores de densidade dos grãos. Este comportamento dos valores de D_{50} é mais marcante nas análises por peneiramento a úmido e, secundariamente, pelos valores de granulômetro a laser. Esta característica pode ser explicada pela contribuição de partículas mais pesadas e menores de hematita nos valores obtidos por peneiramento a úmido (massa) e, em menor relevância, nos valores obtidos por volume (granulômetro a laser); inversamente aos grãos de quartzo que se apresentam maiores e mais leves. Esta distinção de tamanho entre as duas fases minerais principais também está presente nos valores de CU, que resultam em muito uniforme a uniformidade média.

Outro fator que corrobora com esta interpretação é a presença de grãos ligeiramente mais lamelares (relação de aspecto = 1,42) e menos esféricos (esfericidade = 0,75) o que permite uma contribuição ao transporte mais eficiente de partículas de hematita, atingindo assim maiores distâncias em relação ao ponto de lançamento. Os grãos dos rejeitos permanecem sub-angulares (0,3) e essencialmente esferoidais a aciculares (0,78) ao longo de toda a praia.

De todo o exposto, representa-se esquematicamente o perfil da praia de rejeitos da barragem Doutor (Figura 175).

Figura 175 – Perfil longitudinal esquemático do padrão da distribuição dos grãos ao longo da praia de rejeitos da barragem Doutor.

A barragem Campo Grande demonstra notável tendência de diminuição nos valores de densidade dos grãos, acompanhada pela discreta e irregular diminuição da granulometria em direção à lagoa de decantação. Este comportamento dos

valores de D_{50} é mais marcante nas análises realizadas em granulômetro a laser que nas análises por peneiramento a úmido. Este padrão é formado pela influência das duas fases minerais principais presentes, quartzo e hematita, com características de forma e tamanho próximas e densidade significativamente distinta. Nesta barragem as partículas mais pesadas de hematita contribuem para os valores obtidos por peneiramento a úmido (massa); já os grãos de quartzo contribuem para os valores obtidos por granulômetro a laser (volume).

Assim, a similaridade de forma, com grãos esferoidais a aciculares (esfericidade = 0,78), angulares a sub-angulares (arredondamento = 0,2-0,3) e tamanho é sobreposta pela influência da densidade dos grãos.

As variações dos valores de CU, que resultam em muito uniforme a uniformidade média, podem ser interpretadas pela influência de fases minerais distintas, com predomínio em diferentes faixas granulométricas, como também pelas possíveis mudanças no regime de fluxo de água na praia de rejeitos.

Os dados apresentados e discutidos permitem representar, esquematicamente, o perfil da praia de rejeitos da barragem Campo Grande como demonstrado na Figura 176.

Figura 176 – Perfil longitudinal esquemático do padrão da distribuição dos grãos ao longo da praia de rejeitos da barragem Campo Grande.

Considerando-se os dados obtidos e os preceitos da norma soviética (SNIP-II-53-73) os materiais coletados ao longo das praias se enquadram no limite entre solos do Grupo I e do Grupo III. Os materiais do Grupo I podem ser utilizados em barragens de seção homogênea e os materiais do Grupo III devem ser utilizados

com algumas restrições e cuidados, principalmente voltados à diminuição das velocidades de lançamento.

Apesar da importante contribuição dos valores de densidade e de tamanho dos grãos, e, secundariamente da forma dos mesmos no padrão de sedimentação das praias de rejeitos analisadas, destaca-se o notável padrão irregular na distribuição destes dados. Este padrão irregular pode levar à interpretação de aleatoriedade da sedimentação, ou ainda, a ausência de padrão na sedimentação.

Entretanto, é importante ressaltar a influência da dinâmica dos fluxos (vazão) e da concentração das polpas as quais as praias de rejeitos estão sujeitas. Mesmo em situações em que tais parâmetros sejam mantidos constantes, a posição dos canais de transporte dos sedimentos se modifica ao longo das praias, tal como, em situação análoga, nos depósitos de leques aluviais do tipo úmido com constante abastecimento da área fonte.

Analogamente ao que ocorre em leques aluviais do tipo úmido, nas praias de rejeitos, predominam canais de transporte que migram ativamente, transportando e erodindo a superfície do terreno à medida que recebem material do ponto de lançamento da polpa (área fonte). Este processo ocorre de modo irregular e descontínuo na natureza, uma vez que o fornecimento de novos materiais e água não é constante. No caso das praias de rejeitos a migração dos canais distributários e o avanço do lobo distal ocorrem com maior velocidade, restringindo, mas não impedindo, processos superficiais de erosão eólica, erosão laminar (pelo efeito de chuvas), crescimento vegetal e formação de solo. Assim, o depósito em barragens de rejeitos não ocorre de maneira laminar uniforme.

Este padrão de erosão e transporte, que gera as irregularidades observadas, é importante do ponto de vista geotécnico. Pois, principalmente nas situações em que o material a ser lançado não é homogêneo, seja em granulometria ou mineralogia, a constante dinâmica de variação da posição dos canais de transporte pode formar “paleo-vales”. Esses “paleo-vales”, após sucessivos processos de deposição (alteamento), possibilitam a formação de lentes e/ou canais com variação de permeabilidade. Esta variação de permeabilidade, mesmo que pequena, pode resultar em caminhos preferenciais de percolação no maciço alteado e este padrão poderia explicar, teoricamente, os inúmeros casos de “*piping*” relatados em barragens de rejeitos, responsável por cerca de 25% dos acidentes (Arnez, 2004).

Diferentemente de modelos conceituais simplificados, que apontam zonas de maior permeabilidade próximas ao ponto de lançamento e progressivamente menores à medida que se afastam, os resultados aqui apresentados demonstram um modelo mais complexo de permeabilidade, em que não são possíveis delimitar zonas de permeabilidade, mas sim estratos ou camadas como esquematizado na Figura 177.

Figura 177 – Perfil longitudinal esquemático da variação da permeabilidade horizontal (K_h) ao longo das praias de rejeitos. Os comprimentos dos vetores demonstram a variação de K_h em função da camada atravessada.

A geometria complexa apresentada permite a formação de aquíferos suspensos, em lentes. Desse modo tal situação pode explicar a dificuldade de expulsão da água com os sucessivos carregamentos e, assim, contribuir no processo de liquefação, que corresponde a cerca de 50% dos acidentes em barragens de rejeitos (Arnez, 2004).

A variabilidade deposicional observada, portanto, é fundamental do ponto de vista estrutural uma vez que altera parâmetros importantes do barramento, inclusive a resistência ao cisalhamento. Como constatado por Lopes (2000), em ensaios de cisalhamento direto, grãos mais grossos e com maior teor de ferro apresentam ângulos de atrito maiores em mesma situação de porosidade de campo. Essas diferenças de granulometria e densidade ao longo da praia, associadas à mineralogia do aterro, podem gerar recalques diferenciais no corpo do barramento.

A distribuição irregular dos valores referentes aos parâmetros avaliados também pode gerar solos com diferentes estados de compactidade, desde fofos até compactos, o que ressalta a importância no controle de qualidade do lançamento. Como o controle de compactação ao longo das praias de rejeitos é bastante

complexo e perigoso, sugere-se um extenso controle por sondagens a percussão. Este controle permite o conhecimento da evolução do depósito e, deste modo, avaliar a possível presença dos canais de erosão/deposição ao longo das praias de rejeitos ressaltados neste estudo.

Os ensaios de simulação de deposição hidráulica foram realizados para avaliar a similaridade e a correspondência dos parâmetros mensurados nos depósitos estudados. Destaca-se que para a sua realização, foram desenvolvidas considerações relacionadas aos problemas de adequação de escala a partir de estudos feitos em diferentes locais e épocas, os quais validam a realização dos ensaios de simulação sem formalismo na redução de escala.

Na tentativa de reproduzir as condições de lançamento da polpa observadas em campo, foram realizadas simulações com uma única concentração, respeitando os valores fornecidos pelas mineradoras. Esta característica inicial é fundamental para as condições do equipamento, forma de amostragem e quantidade total de amostra disponível utilizada, visto que no momento da amostragem do material depositado em simulação, eram coletadas diversas seqüências de deposição. Portanto, se houvesse variações de concentração, isto poderia interferir significativamente nos resultados e considerações aqui apresentadas.

O primeiro aspecto de similaridade entre o depósito formado no canal sedimentológico adaptado e as condições de campo foi o perfil longitudinal da praia. Este perfil é marcado pela concavidade e ângulo médio no trecho mais planar entre 2° e 3°. O perfil da simulação com material proveniente do beneficiamento de minério de ferro se mostrou com menor extensão até o ponto de formação do equivalente a lagoa de decantação. Neste caso a lagoa situava-se a 100cm do ponto de lançamento e no caso dos rejeitos de fosfato, a 120cm.

As condições de fluxo utilizadas permitiram a reprodução de condições similares ao observado em campo promovendo a formação de canais efêmeros meandantes visíveis em superfície (Figura 178), responsáveis pela seqüência de sedimentação e transporte.

Na formação do depósito hidráulico foram observadas lentes com diferentes relações de espessura/comprimento que se sobrepõem em um contínuo processo de progradação. Esta característica geométrica do depósito pode ser constatada pela diferença mineralógica dos grãos presentes nos diferentes rejeitos utilizados (Figura 179). Este padrão é menos visível no perfil da barragem de simulação

utilizando os rejeitos da barragem Campo Grande. Nela, os minerais ferrosos eram transportados preferencialmente para maiores distâncias na forma de leque a partir do ponto de lançamento.

Figura 178 – Visão da superfície e canais meandrantos formados ao longo da praia na simulação hidráulica de barragem de rejeitos.

Figura 179 – Perfil longitudinal ao longo das praias de rejeitos. Observar formação de lentes com diferentes texturas e coloração evidenciando diferenças mineralógicas na simulação com rejeitos da barragem B5 (a) e Campo Grande (b).

O transporte dos sedimentos ferrosos era limitado pelas paredes de vidro, que provocavam o acúmulo deste material nas laterais do canal e serviam como uma barreira ao crescimento do depósito. Tal limitação física influenciou significativamente a formação da região lateral do depósito, de modo que ao escoar superficialmente, a água era conduzida para as paredes e neste instante, encontrava uma condição de contorno com menor rugosidade e atrito, resultando em aumento da velocidade e, conseqüentemente, erosão e transporte do sedimento (Figura 180) como já constatado por Boldt (1988) em simulações nos Estados Unidos.

Figura 180 – Vista da praia de rejeitos em simulação hidráulica, com efeito das paredes (condição de contorno) na erosão e transporte dos grãos. As flechas indicam a redistribuição dos materiais erodidos na região lateral a montante.

A redistribuição dos sedimentos parece ter afetado a distribuição granulométrica, pois nas duas simulações os valores de D_v e D_{av} tendem a diminuir até a região próxima a esta convergência (70cm) com posterior aumento dos valores até os pontos mais distantes amostrados.

As Tabelas 40 e 41 sintetizam a comparação dos valores obtidos nas barragens àqueles da simulação. Os resultados mostram diferenças significativas

entre os valores constatando a condição não satisfatória de realização dos ensaios em semelhança às condições de campo.

Tabela 40– Dados de D_{50} das amostras coletadas em campo e em simulação das barragens B5 e Campo Grande.

Diâmetro (mm)	Barragem B5		Barragem Campo Grande	
	Campo	Simulação	Campo	Simulação
D_{50} (granulômetro a laser)	0,084 a 0,156	0,123 a 0,327	0,075 a 0,337	0,144 a 0,276
D_{50} (análise de imagem)	0,107 a 0,154	0,109 a 0,270	0,113 a 0,168	0,139 a 0,241

Os dados de esfericidade tendem a diminuir nos pontos mais distantes do lançamento em simulação. Esta diminuição ocorre pela presença do mineral quartzo, que na observação em MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) das amostras de campo, apresenta as maiores dimensões e é um dos mais prismáticos (aciculares).

Comparativamente aos dados de campo, os valores obtidos após simulação são similares, porém apresentam pequenas diferenças. Essas diferenças não podem validar ou negar as condições de simulação, uma vez que os dados obtidos em campo são pouco variáveis e não diagnósticos do comportamento na barragem.

Tabela 41– Dados médios de relação de aspecto e esfericidade das amostras coletadas em campo e em simulação das barragens B5 e Campo Grande.

Diâmetro	Barragem B5		Barragem Campo Grande	
	Campo	Simulação	Campo	Simulação
Relação de aspecto	1,37	1,36	1,38	1,38
Esfericidade	0,78	0,79	0,79	0,80

De todo o exposto, observa-se que as condições das simulações hidráulicas realizadas, apesar dos cuidados observados na operação, nos rejeitos de fosfato (B5-Bunge) e ferro (Campo Grande-CVRD), sofreram problemas relacionados à parede do canal, com menor atrito e, portanto, menor coeficiente de Manning. Esta condição resultou em um forte processo de arraste dos sedimentos e erosão lateral, com a conseqüente alteração do processo de sedimentação quando comparada as condições reais.

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Dentre os resultados obtidos pode-se afirmar que:

- As técnicas de análises mineralógicas e químicas utilizadas, difração de Raios-X e microscópio eletrônico de varredura, mostram-se complementares e essenciais para o conhecimento básico de amostras provenientes das barragens de rejeitos.
- Em especial, a técnica de microscopia eletrônica de varredura, realizada com a preparação adequada evitando a deposição dos grãos de forma preferencial, facilita a observação da forma sobre todos os aspectos tradicionalmente utilizados na sedimentologia.
- Apesar de ser uma técnica nova no país, a análise de forma quantitativa, aplicada pelo método de análise de modo dinâmico, reproduz as características observadas na análise de forma qualitativa, porém mostra grande confiabilidade estatística em função do grande número de dados obtidos, e por isso, apresenta vantagem sobre o método estático.
- Ao contrário do que é tradicionalmente descrito e considerado pela extensa literatura estudada, a granulometria não atua isoladamente no processo de segregação hidráulica da praia de rejeitos e, portanto, não pode ser considerada como o parâmetro fundamental nos estudos de segregação hidráulica aplicada a barragens de rejeitos.
- Como já considerado por décadas na engenharia mineral, a densidade atua com a granulometria na seleção mineralógica e, portanto, afetam diretamente o padrão da sedimentação.
- Em analogia a exemplos naturais de formação de leques aluviais, pode-se afirmar que a deposição dos grãos ao longo das praias de rejeitos não ocorre de maneira linear e uniforme, mas sim com a participação ativa dos canais meandantes no equilíbrio entre transporte e sedimentação.
- A constante migração dos canais e o retrabalhamento do material depositado geram depósitos em formas de lentes, que se sobrepõem e se justapõem constantemente, resultando em áreas de concentração ora com predomínio de grãos mais grossos ora mais densos.

- O padrão de sedimentação gerado resulta na formação de “paleo-vales”, os quais, após sucessivos processos de deposição (alçamento), formam lentes e/ou canais com variação de permeabilidade. Esta variação de permeabilidade pode resultar em caminhos preferenciais de percolação no maciço, aumentando o risco de “*piping*” nestas estruturas.
- Por outro lado as lentes que se depositam com características sedimentares distintas podem favorecer o aprisionamento das águas e contribuir com a liquefação desses materiais granulares.
- As alternâncias de diferentes camadas e lentes, tanto vertical quanto horizontal, podem resultar em recalques diferenciais e diferenças nos parâmetros geomecânicos do maciço.
- Esta complexidade no padrão de sedimentação faz com que as barragens de rejeitos sejam consideradas estruturas mais suscetíveis a problemas geotécnicos, indicando a necessidade de medidas de acompanhamento mais efetivas e mais freqüentes, sendo fundamental uma contínua malha de amostragem do material depositado e plano de instrumentação.
- Esta malha de amostragem deve ser adensada na região próxima às saias dos alçamentos para avaliação granulométrica e de densidade dos futuros materiais de fundação através da realização sistemática de sondagens a percussão acompanhadas de ensaios de infiltração, avaliando assim a presença de paleo-vales ao longo do depósito.
- O plano de instrumentação, composto fundamentalmente por piezômetros simples e multi-níveis, deve ser elaborado a partir das investigações de sub-superfície realizadas, uma vez que estas são orientativas da malha de distribuição de piezometria e definição das profundidades críticas ao monitoramento.
- O arredondamento observado em todos os materiais estudados classifica os sedimentos como angulosos a sub-angulosos (0,2 a 0,3); em pequena proporção são observados grãos sub-arredondados (0,4), gerados pelo ataque químico e películas de goethita presentes nas superfícies dos grãos.
- Nos materiais estudados não foi observada a influência significativa da forma dos grãos no padrão de distribuição dos sedimentos, sendo mantidas

as suas características (esfericidade e relação de aspecto) em praticamente toda a praia.

- A simulação hidráulica de lançamento de rejeitos sem rigor de escala exhibe similaridade entre o depósito formado no canal sedimentológico adaptado e as condições de campo nos aspectos: perfil longitudinal da praia e formação de canais efêmeros meandantes responsáveis pela sedimentação / transporte.
- Na formação do aterro hidráulico foram observadas lentes com diferentes relações de espessura / comprimento que se sobrepõem em um contínuo processo de progradação do depósito. Esta característica geométrica foi constatada pela diferença mineralógica dos grãos presentes nos diferentes rejeitos utilizados, especialmente nos rejeitos de fosfato.
- Apesar dos cuidados observados na operação da simulação hidráulica realizada houve problemas relacionados às paredes do canal, que possuem menor atrito, resultando em forte processo de arraste dos sedimentos e erosão lateral, com a conseqüente alteração do processo de sedimentação.
- A redistribuição dos sedimentos afetou a distribuição granulométrica, pois nas duas simulações os valores de D_v e D_{av} tendem a diminuir até certo ponto (região de convergência do material erodido das paredes) com posterior aumento dos valores até as regiões mais distantes amostradas.

De maneira geral a amostragem adotada neste estudo permite observar a variabilidade deposicional ao longo das praias de rejeitos. Entretanto, a mesma pode ser modificada a fim de aumentar a confiabilidade dos dados e melhor caracterizar as variações aqui relatadas. Assim recomenda-se que sejam desenvolvidos, em trabalhos futuros, uma malha regular com igual espaçamento entre os pontos, estendendo lateralmente e longitudinalmente, de modo a cobrir maior área do aterro.

Conforme discutido anteriormente, a amostragem utilizada contempla uma restrita faixa temporal do depósito. Assim é importante considerar para trabalhos futuros a relação temporal de variabilidade deposicional e, quando possível, associá-las, no momento da amostragem, a parâmetros geotécnicos tais como ensaios “*in situ*” (SPT, torque, permeabilidade). A comparação destas informações com os parâmetros estudados nesta pesquisa podem contribuir no modelo estabelecido de

deposição dos aterros hidráulicos de barragens de rejeitos e confirmar a variabilidade espacial das camadas.

O desempenho do equipamento de simulação hidráulica utilizando a experiência adquirida ao longo de décadas de outros estudos mostrou-se satisfatório para uma faixa de amostragem, uma vez que o depósito sofre interferência da parede do canal utilizado, modificando o processo de transporte e sedimentação. Outro fator importante, constatado na experiência do presente estudo, é a importância do controle de fluxo e forma de lançamento dos rejeitos.

Assim recomenda-se que sejam desenvolvidos em trabalhos futuros de simulação hidráulica métodos de controle de fluxo mais eficientes e canais de maior largura evitando problemas relacionados a estas variáveis e tais constatações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abadjiev, C.B. 1985. Estimation of the physical characteristics of deposited tailings in the tailings dam of non-ferrous metallurgy. In: 11th International Conference of Soil Mechanics and Foundations Engineering – ISSMFE. San Francisco, USA. 3:1231-1234.
- Abrão, P.C. 1987. Sobre a deposição de rejeitos de mineração no Brasil. In: Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração. A.A. CBGB (Ed.). REGEO'87. ABMS/ ABGE/ CBGB. Rio de Janeiro, RJ. p.1-10.
- Allen, J.R.L. 1970. Physical processes of sedimentation: an introduction. London. Allen & Unwin. 248p.
- _____. 1984. Sedimentary structures: their character and physical basis. Ed. Amsterdam. Oxford, Elsevier. 1v.
- Almeida, G.C.P. 2005. Caracterização física e classificação dos solos. Universidade Federal de Juiz de Fora. Faculdade de Engenharia. Departamento de Transportes. Apostila de Curso. 145p.
- Almeida-Prieto, S.; Blanco-Méndez, J.; Otero-Espinar, F.J. 2004. Image analysis of the shape of granulated powder grains. Journal of Pharmaceutical Sciences, v.93, no.3, Mar/2004. p.621-634.
- Arnez, F.I.V. 1999. Avaliação das principais causas de acidentes em barragens de contenção de rejeitos devido a fatores geológicos e geotécnicos. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Minas. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. 83p. e anexos.
- _____. 2004. Avaliação de barragens de rejeitos através de modelos reduzidos. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. 104p. e anexos.
- Associação Brasileira de Geologia de Engenharia – ABGE. 1996. Ensaio de Permeabilidade em Solos – Orientações para sua Execução no Campo – 3ª Edição, São Paulo.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 1984a. Solo – Análise granulométrica. NBR-7181. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo. 13p.
- _____. 1984b. Grãos de solo que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica. NBR-6508. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo. 8p.
- _____. 1984c. Solo - Determinação do limite de liquidez. NBR-6459. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo. 6p.
- _____. 1984d. Solo - Determinação do limite de plasticidade. NBR-7180. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo. 3p.
- _____. 1986. Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. NBR-6457. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo. 9p.
- _____. 1993. Elaboração e apresentação de projeto de disposição de rejeitos de beneficiamento, em barramento, em mineração. NBR-13028, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo. 10p.
- _____. 2001a. Agregados - Amostragem NBR-NM-26. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo. 10p.
- _____. 2001b. Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório NBR-NM-27. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo. 7p.

- Associação Paulista de Engenheiros de Minas - APEMI. 1987. Glossário de termos técnicos de mineração. Cadernos Técnicos APEMI, 1. São Paulo, SP.
- Bagnold, R.A. 1973. The nature of saltation and bed-load transport in water. *Proceedings of Royal Society. London.* 332A: 473-504.
- Beckman Coulter. 2006. Rapidvue particle analysis system: user's reference. 59p.
- Benckert, A. & Eurenus, J. 2001. Tailings dam constructions. In: Seminar on Safe Tailings Dam Constructions. Gallivare, Swedish Mining Association, Natur Vards Verket, European Commission. p. 30-36.
- Best, J & Foulke, B. 2007. Lecture 7: Sediment entrainment and transport: making the sedimentary system tick; bedform initiation. *Geology 440 Sedimentology and stratigraphy: processes, environments and deposits.* Disponível em <<http://classes.geology.uiuc.edu/07SprgClass/geo440/LectureNotes.html>> Acesso em: 01/2007.
- Blight, G.E. 1994. The master profile for hydraulic fill tailings beaches. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering*, 107: 27-40.
- Blight, G.E & Bentel, G.M. 1983. The behavior of mine tailings during hydraulic deposition. *Journal of South African Institute of Mine and Metallurgy*, 3(4): 73-86.
- Blight, G.E & Fourie, A.B. 2005. Catastrophe revisited – disastrous flow failures of mine and municipal solid waste. *Geotechnical and Geological Engineering*, 23: 219–248.
- Blight, G.E.; Thomson, R.R. Vorster, K. 1985. Profiles of hydraulic fill tailings beaches and seepage trough hydraulically sorted tailings. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 85(5): 157-161.
- Bittar, R.J. 2006. Caracterização tecnológica de rejeitos de fosfato e análises da estabilidade da barragem de contenção de rejeitos B5 da Bunge Mineração S.A. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Ouro Preto, MG. 257p.
- Boldt, C.M.K. 1988. Beach characteristics of mine waste tailings. US Bureau of Mines. Report Investigation, R19171, 24p.
- Borovoi, A.A.; Mikhailov, L.P.; Moiseev, I.S.; Radchenko, V.G. 1982. Soils for and methods of embankment dam construction. In: 14th International Congress of Large Dams. Rio de Janeiro, RJ. 4: 503-516.
- Busch, R.G. 1987. Construção de barragens com rejeitos de fosfato. In: Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração. A.A. CBGB (Ed.). REGEO'87. ABMS/ ABGE/ CBGB. Rio de Janeiro, RJ. v.1, p.379-396.
- Caldwell, J.A. & Robertson, A. 1986. Geotechnical stability considerations in the design and reclamation of tailings impoundments. In: *Geotechnical Stability in Surface Mining*. Calgary, Alberta, Nov/1986.
- Caputo, H.P. 1988. Mecânica dos solos e suas aplicações. Livros Técnicos e Científicos, 6a ed. 1V. Rio de Janeiro, RJ.
- Centro de Tecnologia Mineral – CETEM. 2001. Usinas de beneficiamento de minérios do Brasil. Sampaio, J.A.; Luz, A.B. da; Lins, F.F. (ed.). Rio de Janeiro, CETEM/MCT. 398p.
- Chaves, A.P. & Fujimura, F. 1991. Utilização de barragens de rejeitos na indústria minero-metalúrgica. In: *Seminário sobre Recuperação de Rejeitos na Indústria Metalúrgica*. ABM, São Paulo, SP.
- Chien, N. & Wan, Z. 1999. Mechanics of sediment transport. American Society of Civil Engineers. Reston, Virgínia, USA. 913p.

- Cho, G.; Dodds, J.; Santamarina, J.C. 2006. Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: natural and crushed sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. ASCE. May/2006. p.591-602.
- Companhia Vale do Rio Doce - CVRD. 2006. Fluxograma Alegria 3G. Documento interno. Arquivo Microsoft PowerPoint.
- Costa Lima, G.A. 2001. Análise dos impactos das vibrações geradas por desmontes em taludes das minerações – estudo de caso da Mina de Timbopeba em Ouro Preto (MG). *Geografia*. v.10 (2) – Jul/Dez 2001.
- D'Agostino, L.Z. 2004. Uso de finos de pedreira no preparo de argamassas de assentamento. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. 119p.
- De Groot, M.B.; Heezen, F.T.; Mastbergen, D.R.; Stefess, H. 1988. Slopes and density of hydraulic placed sands. *Hydraulic Fill Structures*. ASCE. Geotech Special Publication no 21. Van Zyl, D.J.A. & Vick, S.G. (eds.). p. 32-51.
- Departamento de Estradas de Rodagem - DER/MG. Mapa rodoviário do estado de Minas Gerais. Disponível em: <http://www.der.mg.gov.br/html/mapa_rodoviario/indice/indice.htm> Acesso em: 06/2005.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER. 1994. Solos - Determinação da densidade real. DNER-ME 093/94. Brasília, DF. 4p.
- Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM. 1984. Código de mineração e legislação correlata. República Federativa do Brasil. Ministério das Minas e Energia. Brasília, DF. 292p.
- _____. 2001. Anuário mineral brasileiro. República Federativa do Brasil. Ministério das Minas e Energia. Brasília, DF.
- _____. 2002. Sumário mineral. República Federativa do Brasil. Ministério das Minas e Energia. Brasília, DF.
- _____. 2006. Sumário mineral. República Federativa do Brasil. Ministério das Minas e Energia. Brasília, DF.
- _____. 2007. Sumário mineral. República Federativa do Brasil. Ministério das Minas e Energia. Brasília, DF.
- Dias, J.A. 2004. IV - Morfometria. In: Dias, J.A. Análise sedimentar e o conhecimento dos sistemas marinhos. (Uma introdução à oceanografia geológica). p.28-42. Disponível em: <http://w3.ualg.pt/~jdias/JAD/e_b_Sedim.html>
- Espósito, T.J. 1995. Controle geotécnico da construção de barragens de rejeito - análise de estabilidade de taludes e estudos de percolação. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasília, DF. 159p.
- _____. 2000. Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Brasília. Brasília, DF. 363p.
- Fan, X. 1989. Laboratory modelling of beaches profile in tailings disposal. M.Sc. Thesis, Department of Chemical Engineering. University of Alberta, Canada. 97p.
- Fan, X. & Masliyah, J. 1990. Laboratory investigation of beach profiles in tailings disposal. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 116 (11): 1357-1373.
- Ferreira, R.C.; Peres, J.E.E.; Monteiro, L.B. 1980. Geotechnical characteristics of hydraulic fill scale models. In: 13th Brazilian National Conference of Large Dams, CBGB. Rio de Janeiro, RJ. p.496-516.

- Filimonov, V. 1979. Relatório técnico sobre o aterro hidráulico da Usina de Porto Primavera. Themag Engenharia, 56p.
- Fiori, A.P. & Carmignani, L. 2001. Fundamentos de mecânica de solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes. Curitiba, PR. Editora da UFPR. 548p. Série Pesquisa 53.
- Fourie, A. 1988. Beaching and permeability properties of tailings. ASCE. Geotech Special Publication no 21. Van Zyl, D.J. & Vick, S.G. (eds.), p. 142-154.
- Fujimura, F. & Soares, L. 1996. Sistemas de disposição de resíduos particulados em mineração. São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas, Escola Politécnica da Universidade de Paulo. Apostila de aulas.
- Geoconsultoria. 1998a. Companhia Vale do Rio Doce - CVRD - Mina de Timbopeba. Barragem de rejeitos - Córrego do Doutor, Projeto Executivo. Relatório de Projeto VL01-RT-02. Rev. 2; 03-09-1998.
- _____. 1998b. S.A. Min. da Trindade - SAMITRI, Mina de Alegria. Barragem do Campo Grande, Alçamento com rejeitos, Projeto Executivo. Relatório do Projeto ST03-RT-01. Rev. 0; 15-07-98.
- Gilbert, G.K. 1914. Transportation of debris by running water. US Geological Survey, no 86, 263p.
- Google Earth Software for Windows. (Release 4). Google Inc. 2006.
- Graf, W.H. 1984. Hydraulics of sediment transport. Water Resources Publications, Littleton, Colo. c1984, 513p.
- Gregório Filho, J; Nieble, C.M. Barragens de rejeito: concepção e projeto. In: Simpósio de Mineração, 5º, Universidade Federal de Ouro Preto. Anais, v. 2, pp 275-299. Ouro Preto, MG. 1975.
- Grishin, M.M. 1982. Hydraulic structures. Mir Publishers (Translated from the Russian by Prem Kumar Dang), Moscow, URSS. v.1, 468p.
- Hazen, A. 1920. Hydraulic fill dams. Transactions, ASCE, 83: 1713-1745.
- Henderson, M.E. 1988. Slurry pipelines: present and future. Hydraulic Fill Structures, ASCE. Fort Collins, USA. p. 155-165.
- Hernandez, H.M.O. 2002. Caracterização geomecânica de rejeitos aplicada a barragens de aterro hidráulico. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasília, DF. 174p.
- Heywood, H. 1953. Fundamental principles of sub-sieve particle-size measurement. In: Recent developments in mineral dressing. A symposium arranged by the Institution of Mining and Metallurgy, held on 23rd-25th September, 1952, at the Huxley Building, Imperial College of Science and Technology, London. Imprenta London, 1953. 766 p.
- Hjulstrom, F. 1935. Studies of morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyris. Univ. Upsala, Geol. Inst. Bull 25: 221-557.
- Hooke, R.L. 1967. Process on arid-region alluvial fans. Journal of Geology, 75: 438-460.
- _____. 1968. Model geology: prototype and laboratory streams: discussion. Geological Society of America. Bulletin 79: 391-394.
- Hooke, R.L. & Rohrer, W.L. 1979. Geometry of alluvial fans: effects of discharge and sediment size. Earth Surface Processes, 4: 147-166.
- Hsu, S.J.C. 1988. Review of practice in hydraulic fill construction. Hydraulic Fill Structures. Fort Collins. New York: ASCE. p. 884-901 (Geotechnical Special Publication, 21).

- International Commission on Large Dams - ICOLD. 1982. World register of mine and industrial tailings dams. International Commission on Large Dams, Paris, 159p.
- _____. 1989. Tailings dam safety: guidelines. Commission Internationale des Grands Barrages, Committee on Mine and Industrial Tailings Dams, Paris, 107p.
- _____. 1994. Tailings dams design of drainage, review and recommendations. Commission Internationale des Grands Barrages, Paris, 120p.
- _____. 1995a. Tailings dams and seismicity: review and recommendations. Commission Internationale des Grands Barrages, Committee on Mine and Industrial Tailings Dams, Paris, 60p.
- _____. 1995b. Tailings dams, transport placement and decantation. Bulletin. Commission Internationale des Grands Barrages, Paris, 97p.
- _____. 1996a. Monitoring of tailings dams: reviews and recommendations. Bulletin. Commission Internationale des Grands Barrages, Paris, 84p.
- _____. 1996b. Tailings dams and environment: review and recommendations. Commission Internationale des Grands Barrages, Paris, 103p.
- _____. 2001. Tailings dams: risk of dangerous occurrences: lessons learnt from practical experiences. Commission Internationale des Grands Barrages, Committee on Tailings Dams and Waste Lagoons, Paris, 144p.
- International Council on Metals and the Environment & United Nations Environment Programme Industry and Environment. 1998a. Case studies on tailings management. ICME & UNEPIE, Ottawa, Canada and Paris, France, iv, 58p.
- _____. 1998b. Proceedings of the International Workshop on Risk Management and Contingency Planning in the Management of Mine Tailings: Buenos Aires, Argentina, Nov 5-6, 1998. ICME & UNEPIE, Buenos Aires, Argentina, 314p.
- International Institute for Environment and Development - IIED. 2002. Minería, minerales y desarrollo sustentable en Brasil. Minería y Minerales de América del Sur en la Transición al Desarrollo Sustentable. MMSD & IIED (eds.), 108p.
- International Organization for Standardization - ISO. 2004. ISO 13322-1/04. Particle size analysis -- Image analysis methods -- Part 1: Static image analysis methods. 39p.
- _____. 2006. 13322-2/06 Particle size analysis -- Image analysis methods -- Part 2: Dynamic image analysis methods. 24p.
- Kahn, H. 2003. Amostragem e preparação de amostras. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Apostila da disciplina "Caracterização Tecnológica de Matérias Primas Mineraias".
- Klohn, E.J. 1982. Design and construction of tailings dams. CIM Transactions, v. LXXV.
- Krause, A.J. 1997. Regulatory and technical tailings design considerations in Chile. In: Proceedings of the 4th International Conference on Tailings and Mine Waste '97, Fort Collins, Colorado, USA. p. 51-55.
- Krumbein, W.C. 1941. Measurements and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. Journal of Sedimentary Petrology. 11 (2): 64-72.
- Küpper, A.M.A.G. 1991. Design of hydraulic fill. PhD Thesis, Dept. of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Canada. 525p.
- Küpper, A.M.A.G.; Morgenstern, N.R.; Seco, D.C. 1992a. Laboratory test to study hydraulic fill. Canadian Geotechnical Journal, 29(3): 405-417.
- _____. 1992b. Comparisons between various flumes test used for hydraulic-fill studies. Canadian Geotechnical Journal, 29(3): 418-425.

- Leeder, M.R. 1985. *Sedimentology: process and product*. London. Allen & Unwin. 1v.
- Lopes, M.C.O. 2000. Deposição hidráulica de rejeitos granulares e a influência nos seus parâmetros de resistência. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília, DF. 158p.
- Luz, A. B.; Sampaio, J.A.; Almeida, S.L.M. 2004. Tratamento de minérios. 4. ed. Ed. Adão Benvindo da Luz, Mario Valente Possa, Salvador Luiz de Almeida. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 1998. 867 p.
- Mackin, J.H. 1948. Concept of the graded river. *Geological Society of America. Bulletin* 59: 463-512.
- Margolis, S.V. & Krinsley, D.H. 1974. Process of formation and environmental occurrence of microfeatures on detrital quartz grains. *American Journal of Science*. v.274 p.449-464.
- Mazzullo, J. & Ritter, C. 1991. Influence of sediment source on the shapes and surface texture of glacial quartz and sand grains. *Geology*. v.19 p.384-388.
- McLane, M. 1995. *Sedimentology*. New York, Oxford University Press, 1995. 423p.
- Melent'ev, V.A., Kolpashnikov, N.P. Volnin, B.A. 1973. Hydraulic fill structures. Energy, Moscow, URSS (English Translation).
- Mello, V. & Teixeira, A.M. 1967. Mecânica dos solos. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. (Publicação no 137).
- Mindat. Apresenta dados sobre minerais. Disponível em <www.mindat.org>. Acesso em: 2007.
- Minerais do Paraná S/A. - MINEROPAR. Apresenta dados da geologia básica e dos recursos minerais Paranaenses. Disponível em: <<http://www.pr.gov.br/mineropar/rocha.html>> Acesso em Jan/2004.
- Mining Association of Canada. 1998. A guide to the management of tailings facilities. Mining Association of Canada. Ottawa, Ont. 1v. 54p.
- Moretti, M.R. 1988. Aterros hidráulicos - a experiência de Porto Primavera. Dissertação de Mestrado. Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 215p.
- Moretti, M.R. & Cruz, P.T. 1996. Aterros hidráulicos e sua aplicação na construção de barragens. In: 100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto. P.T. Cruz (ed.), Oficina das Letras, São Paulo, SP. p. 556-591.
- Morgenstern, N.R. & Küpper, A.M.A.G. 1988. Hydraulic fill structures - a perspective. hydraulic fill structures, ASCE. Geotech Special Publication no 21, Van Zyl, D.J.A. & Vick, S. G. (eds.), p. 1-31.
- Morris, P.H. 1993. Two-dimensional model for subaerial deposition of mining tailings slurry. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Industry*; 102:A181-187.
- _____. 2004. Mine waste beach profile and flow resistance equations. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, v.18, no4, Dec/2004, 20:253-272.
- _____. 2006. Subaerial deposition of mine tailings by dimensionless particle size. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, v.20, Issue 2. Jun. p.155-160.
- Morris, P.H. & Willians, D.J. 1996. Prediction of mine tailings delta profiles. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A - Mining Industry*; 105:A63-A68.
- _____. 1997a. Hydraulic conditions leading to exponential mine tailings delta profiles. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A - Mining Industry*; 106:A34-A37.

- _____. 1997b. Hydraulic sorting of co-disposed coarse and fine coal wastes. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section C - Mineral Processing; 106:C21-C26.
- _____. 1998. Comparison of two mine waste beach profile equations. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. v.12, no.3, p. 97-100.
- Nash, J.T. 2000a. Geochemical studies of mines, dumps, and tailings as sources of contamination, upper Animas River watershed, Colorado. U.S. Geological Survey. Open-File Report 00-104, CD-ROM.
- _____. 2000b, Hydrogeochemical data for historic mining areas, Humboldt watershed and adjacent areas, northern Nevada. U.S. Geological Survey. Open-File Report 00-0459: Disponível em <<http://greenwood/cr.usgs.gov/pub/open-file-reports/ofr-00-0459>>].
- _____. 2002a, Hydrogeochemical investigations of historic mining districts, central Western Slope of Colorado, including influence on surface-water quality: U.S. Geological Survey. Digital Data Series DDS-73, CD-ROM.
- _____. 2002b, Flood deposits of transported mill tailings in Nevada and Utah: evidence for tailings dam failures and implications for risk analysis: U.S. Geological Survey. Open-File Report 02-431, CD-ROM.
- Negro Jr., A.; Santos, F.M.G.; Guerra, M.O. 1979. Características geotécnicas de solos de aterros hidráulicos e a experiência da barragem de Guarapiranga. Revista Solos e Rochas, 1(3): 3-39.
- Oliveira Jr, V.T. 2006. Texturas e propriedades reológicas dos minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero (MG) e sua utilização em beneficiamento. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 176p.
- Papini, C.J. 2003. Estudo comparativo de métodos de determinação do tamanho de partícula. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN. 129p.
- Parker, G. 1999. Progress in the modeling of alluvial fans. Journal of Hydraulic Research/De Recherches Hydrauliques. v.37, no6, p. 805-825.
- Penman, A.D.M. 2001. Risk analysis in tailing dam constructions. In: Safe tailings dam constructions. Seminar on Gällivare, 20-21 Sep/2001. Technical Papers.
- Pettijohn, F.J. 1957. Sedimentary rocks. 2a Ed. New York, Harper. 718p.
- Powers, M.C., 1953. A new roundness scale for sedimentary particles. Journal of Sedimentary Petrology, v.23, p.117-119.
- Ribeiro, L.F.M. 2000. Simulação física do processo de formação dos aterros hidráulicos aplicado a barragens de rejeitos. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Brasília, DF. 235p.
- Rubey, W.W. 1938. The force required to move particles on stream bed. US Geological Survey 189(E): 121-142.
- Septimius, M. Tanasescu, M., Vlad S. N., Ozunu, A. 2006. Lessons learnt from recent mining tailing dam failures and integration in the national legislation of Romania, following the NATECH accident from Baia Mare. Geophysical Research Abstracts, v.8, 07801, p.1607-7962.
- Selley, R.C., 1988. Applied sedimentology. London; San Diego: Academic Press, 1988. 446p.
- Seer, H.J. 1999. Evolução tectônica dos grupos Araxá e Ibiá na sinforma de Araxá-MG. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. Brasília, DF.

- Sharp, J.J. 1981. Hydraulic modelling. Butterworth, London, UK. 242p.
- Soares, L. 2001. Barragens de rejeitos: metodologia de implantação, operação e manutenção. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Apostila de curso. 74p.
- Suguio, K. 1980. Rochas sedimentares: propriedades, gênese e importância econômica. São Paulo: Editora Edgard Blücher. 500p.
- Sumi, E.M. 2005. Estudo da formação de praias em barragens de rejeitos por meio de simulações em tanque de prova. Monografia de Trabalho de Formatura. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. 52p.
- Sympatec, 2007. Image analysis for particle size and shape analysis from 1 μm to 20mm. Disponível em: <<http://www.sympatec.com/ImageAnalysis/ImageAnalysis.html>> Acesso em Jan/2007
- Tailings Info. Fornece dados técnicos e informações sobre processos de disposição de rejeitos. Disponível em: <<http://tailings.info>>. Acesso em 2006.
- Torres, M.G. 1996. Caracterização mineralógica do minério fosfático da Mina da Arafertil S.A. no Complexo Carbonatítico do Barreiro, Araxá-MG. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- United Nations Environment Programme – UNEP. 2000. International Workshop on Environmental Regulation for Accident Prevention in Mining: Tailings and Chemicals Management. Perth, Australia, 26-27 Oct/2000. United Nations Environment Programme Division of Technology, Industry and Economics.
- Uthus, L.; Hoff, I.; Horvli, I. 2005. Evaluation of grain shape characterization methods for unbound aggregates. In: 7th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. Trondheim, Norway.
- Vargas, M. 1978. Introdução a Mecânica dos Solos. Editora da Universidade de São Paulo / Editora McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, SP. 509p.
- Vick, S.G. 1990. Planning, design, and analysis of tailings dams. BiTech, Vancouver, B.C., xi, 369p.
- Williams, D.J. & Morris, P.H. 1989. Comparison of two models for subaerial deposition of mine tailings slurry. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A - Mining Industry, 98:A73-A77.
- Winkelmolen, A.M. 1982. Critical remarks on grain parameters, with special emphasis on shape. Sedimentology 29 (2), 255–265.
- Winterwerp, J.C.; De Groot, M.B.; Mastbergen, D.R.; Verwoert, H. 1990. Hyperconcentrated sand-water mixture flow over flat bed. Journal of Hydraulics Division, ASCE, 116(1): 36-55.
- Winterwerp, J.C.; Bakker, W.T.; Mastbergen, D.R.; VanRossum, H. 1992. Hyperconcentrated sand-water mixture flow over erodible bed. Journal of Hydraulics Division, ASCE, 118(11): 1508-1525
- Yalin, M.S. 1971. Theory of hydraulics models. Macmillan, London, UK. 266p.
- Yufin, A.P. 1965. Hydromechanization. Stroiizdat, Moscow. (English Translation) 496p.

APÊNDICE A – Densidade real dos grãos

APÊNDICE B – Análise quantitativa da forma dos grãos

Amostras coletadas em campo

Amostras coletadas em ensaio de simulação

ANEXO A – Análise granulométrica

Amostras coletadas em campo

Amostras coletadas em ensaio de simulação