

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**EFEITOS DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA  
NO COMPORTAMENTO DE UM REJEITO DE  
MINERAÇÃO DE OURO**

**ENIO FERNANDES AMORIM**

**ORIENTADOR: LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, DSc**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA  
PUBLICAÇÃO: G.DM-161/07**

**Brasília - DF: Junho - 2007**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**EFEITOS DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA NO  
COMPORTAMENTO DE UM REJEITO DE MINERAÇÃO DE OURO**

**ENIO FERNANDES AMORIM**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO  
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
MESTRE EM GEOTECNIA.**

**APROVADA POR:**

---

**Prof. Luís Fernando Martins Ribeiro, DSc (UnB)  
(Orientador)**

---

**Prof. André Pacheco de Assis, PhD (UnB)  
(Examinador Interno)**

---

**Prof. Enivaldo Minette, PhD (UFV)  
(Examinador Externo)**

**Brasília - DF, 27 de Junho de 2007.**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

AMORIM, ENIO FERNANDES

Efeitos do Processo de Deposição Hidráulica no Comportamento de um Rejeito de Mineração de Ouro.

xvi, 109 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2007).

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Rejeito

2. Aterro Hidráulico

3. Beneficiamento de Ouro

4. Geotecnia em Mineração

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

AMORIM, E.F. (2007). Efeitos do Processo de Deposição Hidráulica no Comportamento de um Rejeito de Mineração de Ouro. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-161/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 109 p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: Enio Fernandes Amorim

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Efeitos do Processo de Deposição Hidráulica no Comportamento de um Rejeito de Mineração de Ouro.

GRAU: Mestre

ANO: 2007

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Enio Fernandes Amorim  
Rua São João, 1411 - Lagoa Seca  
59.022-390 - Natal - RN - Brasil.  
Tel. (84) 3223-3883

## DEDICATÓRIA

A Deus

“Desde o início de minha caminhada,  
Tu estavas comigo.  
Dias e noites se passaram.  
Vitórias foram conquistadas.  
Derrotas foram superadas.  
Amizades foram criadas.  
Conhecimentos foram adquiridos...  
e agora que alcancei o meu objetivo,  
venho Te louvar, Te agradecer, Te oferecer  
humildemente a vida, o amor, a felicidade,  
enfim, a vitória deste momento.  
Obrigado Senhor.”

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Luís Fernando Martins Ribeiro pela confiança, orientação, amizade e apoio durante toda a realização deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB pelos conhecimentos transmitidos, em especial os professores André Assis, Ennio Palmeira, Noris Diniz e Renato Cunha, pela amizade construída durante este período.

Aos técnicos do Laboratório de Geotecnia da UnB por todo o apoio durante a fase de realização dos ensaios, de forma especial o técnico Osvaldo pela ajuda constante nas simulações no ESDH.

À Universidade de Brasília pela oportunidade da titulação como Mestre em Geotecnia.

Ao CNPq pelo suporte financeiro durante o primeiro ano de mestrado.

Aos colegas da FUNASA por todo o incentivo na concretização deste trabalho, em especial a minha coordenadora Lucimar Alves, pela compreensão durante os momentos em que precisei me ausentar do local de trabalho em função do desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos da Geotecnia, Josi, Carmem, Petrônio, Cássio, Lorena, Giovanni, Daniel, Salomé, Suzana, Paula e Elza pela convivência durante todo o tempo e momentos de diversão em Brasília.

Aos meus irmãos de república Diego, Juan, Joel, Eider, Maurício, Carlos, Nelson, James, Alberto e Eder pela amizade plantada e por toda a convivência.

E por fim, um agradecimento especial aos meus pais, irmãos e Luaninha (sobrinha), por me proporcionarem momentos felizes durante o desenvolvimento deste trabalho e fazerem parte da minha vida.

## **RESUMO**

### **EFEITOS DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA NO COMPORTAMENTO DE UM REJEITO DE MINERAÇÃO DE OURO**

A disposição de resíduos minerais (rejeitos) por meio da técnica de aterro hidráulico, de uma forma geral, caracteriza-se por apresentar um baixo controle geotécnico. Neste sentido, por apresentar deficiências nas especificações técnicas durante o processo de disposição estes depósitos podem apresentar um elevado risco de ruptura. Assim, para que se possa obter uma estrutura segura e confiável é importante avaliar o comportamento do material depositado em função das variáveis que condicionam o processo de disposição e as características do rejeito. Desta forma, é possível estabelecer técnicas construtivas baseadas em variáveis que venham a condicionar o processo de deposição hidráulica ainda na fase de projeto, garantindo assim uma metodologia construtiva adequada.

Baseado neste contexto, a presente pesquisa apresenta uma avaliação do processo de deposição hidráulica de um rejeito de mineração de ouro a partir de simulações físicas com diferentes níveis de vazão e concentração, utilizando o Equipamento de Simulação de Deposição Hidráulica (ESDH) desenvolvido na Universidade de Brasília. Ao longo das simulações realizadas, em função dos valores de concentração e vazão adotados nos ensaios, pode-se avaliar o comportamento do depósito com base na determinação da inclinação do aterro formado, segregação granulométrica, permeabilidade e densidades, tomando-se como referência à distância do ponto de lançamento até o término do depósito (praia).

Por fim, como resultado deste trabalho, tornou-se possível a obtenção de dados relativos à inclinação do depósito, densidade, segregação hidráulica e permeabilidade, em função da vazão e concentração adotada para a deposição do rejeito de minério de ouro estudado.

## **ABSTRACT**

### **EFFECTS OF THE PROCESS OF HIDRAULIC DISPOSAL ON THE BEHAVIOR OF A RESIDUE OF MINING OF GOLD**

The disposal of mineral residues by the technique of hydraulic embankment, in general is characterized for presenting a low geotechnical control. Then, because of presenting deficiencies in the specifications techniques during the disposal process, these deposits can present a high risk of rupture. Thus, to get a safe structure and trustworthy it is important to evaluate the behavior of the material deposited in function of variables that give condition to the disposal process and the characteristics of this residues. In such a way, it is possible to establish constructive techniques based on variables that determine the process of hydraulic disposal in the project phase, guaranteeing an adjusted constructive methodology.

In this context, this research presents an evaluation of the process of hydraulic disposal of one residue of gold mining from physical simulations with different levels of outflow and concentration, using the Hydraulic Disposal Simulation Equipment (ESDH) developed in the University of Brasilia. Over the simulations performed, dependent of the values of concentration and outflow in the tests, the behavior of the deposit can be evaluated on the basis of the determination of the inclination of the formed embankment, grain sized segregation, permeability and densities, using as a reference the distance of launching point as reference until the ending of the deposit (beach).

Finally, as resulted of this work, it was possible to get data about the inclination of the deposit, density, hydraulic segregation and permeability, in function of the outflow and concentration defined for the deposition of the residue of gold studied.

# ÍNDICE

CAPÍTULO	PÁGINA
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. CONTEXTO GERAL.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.3. ESCOPO DA DISSERTAÇÃO .....	3
2. A ATIVIDADE DE MINERAÇÃO E O BENEFICIAMENTO MINERAL DO OURO.....	5
2.1. INTRODUÇÃO .....	5
2.2. ETAPAS DO PROCESSO DE EXTRAÇÃO MINERAL .....	6
2.3. BENEFICIAMENTO DE MINÉRIOS DE OURO .....	7
2.3.1. Etapas de Preparação no Beneficiamento de Minérios de Ouro .....	7
2.3.1.1. Britagem .....	7
2.3.1.2. Peneiramento .....	10
2.3.1.3. Moagem.....	11
2.3.1.4. Classificação.....	11
2.3.2. Concentração Gravítica .....	14
2.3.2.1. Jigue .....	14
2.3.2.2. Mesa Vibratória.....	15
2.3.2.3. Concentradores Centrífugos .....	17
2.3.3. Flotação .....	17
2.3.3.1. Flotação de Minérios de Ouro.....	17
2.3.4. Fluxogramas de Beneficiamento de Ouro .....	18
3. BARRAGENS DE REJEITOS .....	21
3.1. INTRODUÇÃO .....	21
3.2. ATERROS HIDRÁULICOS.....	23
3.3. CONCEPÇÕES FÍSICAS NOS ATERROS HIDRÁULICOS.....	26
3.4. PARÂMETROS DOS ATERROS HIDRÁULICOS.....	27
3.4.1. Segregação Granulométrica .....	27
3.4.2. Densidade .....	28
3.4.3. Geometria.....	29
3.5. FORMAÇÃO DAS BARRAGENS DE REJEITO POR MEIO DA TÉCNICA DE ATERRO HIDRÁULICO .....	30
3.6. MÉTODOS CONSTRUTIVOS DAS BARRAGENS DE REJEITOS.....	32
3.6.1. Método de Montante .....	33
3.6.2. Método de Jusante.....	35
3.6.3. Método da Linha de Centro.....	36
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	38
4.1. INTRODUÇÃO .....	38
4.2. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO (ESDH) .....	38



4.2.1. Canal de Deposição Hidráulica .....	39
4.2.2. Sistema de Alimentação .....	40
4.2.3. Sistema de Descarga .....	41
4.2.4. Sistema de Drenagem .....	41
4.2.5. Composição Geral .....	42
4.3. SIMULAÇÃO NO ESDH .....	42
4.4. PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	47
4.5. CARACTERÍSTICAS DO MINÉRIO DA MINA DO MORRO DO OURO .....	48
4.5.1. Localização .....	48
4.5.2. Geologia .....	48
4.5.3. Mineralogia .....	49
4.5.4. Lavra e Beneficiamento .....	49
4.5.5. Rejeito utilizado nesta pesquisa .....	50
4.6. ENSAIOS COMPLEMENTARES .....	51
4.6.1. Geometria do Canal .....	51
4.6.2. Granulometria .....	51
4.6.3. Massa Específica dos Grãos .....	51
4.6.4. Densidade In-Situ .....	52
4.6.5. Permeabilidade Saturada .....	52
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	54
5.1. INTRODUÇÃO .....	54
5.2. GEOMETRIA DAS PRAIAS .....	54
5.3. SEGREGAÇÃO HIDRÁULICA .....	61
5.4. PESO ESPECÍFICO DOS GRÃOS .....	75
5.5. PESO ESPECÍFICO SECO .....	81
5.6. ÍNDICE DE VAZIOS .....	88
5.7. PERMEABILIDADE .....	92
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....	96
6.1. CONCLUSÕES .....	96
6.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	100
A. CURVAS GRANULOMÉTRICAS OBTIDAS NAS SIMULAÇÕES REALIZADAS NO EQUIPAMENTO DE SIMULAÇÃO E DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA .....	104

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA</b>	<b>PÁGINA</b>
Figura 2.1 - Exemplo de lavra a céu aberto da Mina de Rio Tinto na Espanha. (FONTE: Rio Tinto Company, 1983) .....	6
Figura 2.2 - Exemplo de lavra subterrânea mostrando um jumbo operando no alargamento da galeria de transporte - Mina de João Belo - BA (FONTE: Jacobina Mineração e Comércio Ltda, 2002) .....	6
Figura 2.3 - Vista da usina de beneficiamento da Mina de Barro Alto - GO. (FONTE: Anglo American, 2003) .....	7
Figura 2.4 - Britador de mandíbula de dois eixos. (modificado - CHAVES & PERES, 1999) .....	8
Figura 2.5 - Corte de um britador de impacto. (modificado - CHAVES & PERES, 1999) .....	9
Figura 2.6 - Cortes de um britador cônico “standard” e de um “short head”. (modificado - CHAVES & PERES, 1999) .....	10
Figura 2.7 - Moinho de carga cadente. (modificado - CHAVES & PERES, 1999) .....	11
Figura 2.8 - Representação de um hidrociclone típico. (modificado - CHAVES et al, 1996) .....	13
Figura 2.9 - Esquema simplificado de um jigue. (modificado - LINS, 1998) .....	14
Figura 2.10 - Esquema simplificado de uma mesa vibratória. (modificado - LINS, 1998) .....	16
Figura 2.11 - Fluxograma do Beneficiamento do Minério de Ouro da Fazenda Brasileiro (modificado - LINS, 1998) .....	19
Figura 2.12 - Fluxograma do Beneficiamento do Minério de Ouro da RPM (modificado - LINS, 1998) .....	19
Figura 3.1 - Barragem de rejeito no norte de Wisconsin, EUA. (modificado - VICK, 1983) .....	23
Figura 3.2 - Geometria típica de uma praia de aterro hidráulico.(modificado - RIBEIRO, 2000) .....	29
Figura 3.3 - Métodos de descarga por ponto único - (modificado - RIBEIRO, 2000) .....	31
Figura 3.4 - Métodos de descarga em linha - (modificado - RIBEIRO, 2000) .....	32
Figura 3.5 - Ilustração representativa do método de montante utilizado na construção de barragens de rejeito - (modificado - VICK,1983) .....	34
Figura 3.6 - Ilustração representativa do método de jusante utilizado na construção de barragens de rejeito - (modificado - KLOHN, 1981) .....	35
Figura 3.7 - Ilustração representativa do método da linha de centro utilizado na construção de barragens de rejeito - (modificado - KLOHN, 1981) .....	36
Figura 4.1 - Ilustração representativa do Equipamento de Simulação de Deposição Hidráulica - ESDH - (RIBEIRO, 2000) .....	39
Figura 4.2 - Visão geral do ESDH (RIBEIRO, 2000) .....	42
Figura 4.3 - Curva granulométrica típica do rejeito da Mina do Morro do Ouro. ....	50
Figura 5.1 - Esquema representativo da praia formada para a simulação C30Q20. ....	55
Figura 5.2 - Esquema representativo da praia formada para a simulação C30Q30. ....	55
Figura 5.3 - Esquema representativo da praia formada para a simulação C35Q20. ....	56
Figura 5.4 - Esquema representativo da praia formada para a simulação C35Q30. ....	56
Figura 5.5 - Perfis obtidos para uma Q próxima a 10 l/min e C entre 10,98 e 18,71%. ....	56
Figura 5.6 - Perfis obtidos para uma Q próxima a 15 l/min e C entre 10,53 e 27,44%. ....	57

Figura 5.7 - Perfis obtidos para uma Q próxima a 20 l/min e C entre 25,86 e 38,56%. .....	57
Figura 5.8 - Perfis obtidos para uma Q próxima a 30 l/min e C entre 29,12 e 34,36%. .....	57
Figura 5.9 - Perfis obtidos para uma C próxima a 10% e Q entre 10,15 e 14,89 l/min. ....	58
Figura 5.10 - Perfis obtidos para uma C próxima a 15% e Q entre 9,77 e 16,16 l/min. ....	58
Figura 5.11 - Perfis obtidos para uma C próxima a 25% e Q entre 15,15 e 21,34 l/min. ....	59
Figura 5.12 - Perfis obtidos para uma C próxima a 30% e Q entre 22,06 e 32,43 l/min. ....	59
Figura 5.13 - Perfis obtidos para uma C próxima a 35% e Q entre 21,20 e 30,77 l/min. ....	59
Figura 5.14 - Variação da inclinação global do depósito com a concentração. ....	60
Figura 5.15 - Variação da inclinação global do depósito com a vazão. ....	61
Figura 5.16 - Variação do $D_{90}$ para Q = 10 l/min e C entre 10,98 e 18,71%. ....	62
Figura 5.17 - Variação do $D_{90}$ para Q = 15 l/min e C entre 10,53 e 27,44%. ....	62
Figura 5.18 - Variação do $D_{90}$ para Q = 20 l/min e C entre 25,86 e 38,56%. ....	63
Figura 5.19 - Variação do $D_{90}$ para Q = 30 l/min e C entre 29,12 e 34,36%. ....	63
Figura 5.20 - Variação do $D_{90}$ para C = 10% e vazões entre 10,15 e 14,89 l/min. ....	63
Figura 5.21 - Variação do $D_{90}$ para C = 15% e vazões entre 9,77 e 16,16 l/min. ....	64
Figura 5.22 - Variação do $D_{90}$ para C = 25% e vazões entre 15,15 e 21,34 l/min. ....	64
Figura 5.23 - Variação do $D_{90}$ para C = 30% e vazões entre 22,06 e 32,43 l/min. ....	64
Figura 5.24 - Variação do $D_{90}$ para C = 35% e vazões entre 21,20 e 30,77 l/min. ....	65
Figura 5.25 - Variação do $D_{50}$ para Q = 10 l/min e C entre 10,98 e 18,71%. ....	66
Figura 5.26 - Variação do $D_{50}$ para Q = 15 l/min e C entre 10,53 e 27,44%. ....	66
Figura 5.27 - Variação do $D_{50}$ para Q = 20 l/min e C entre 25,86 e 38,56%. ....	66
Figura 5.28 - Variação do $D_{50}$ para Q = 30 l/min e C entre 29,12 e 34,36%. ....	67
Figura 5.29 - Variação do $D_{50}$ para C = 10% e vazões entre 10,15 e 14,89 l/min. ....	67
Figura 5.30 - Variação do $D_{50}$ para C = 15% e vazões entre 9,77 e 16,16 l/min. ....	67
Figura 5.31 - Variação do $D_{50}$ para C = 25% e vazões entre 15,15 e 21,34 l/min. ....	68
Figura 5.32 - Variação do $D_{50}$ para C = 30% e vazões entre 22,06 e 32,43 l/min. ....	68
Figura 5.33 - Variação do $D_{50}$ para C = 35% e vazões entre 21,20 e 30,77 l/min. ....	68
Figura 5.34 - Variação do $D_{50}$ com a concentração a 0,80 m do ponto de lançamento. ....	69
Figura 5.35 - Variação do $D_{50}$ com a vazão a 0,80 m do ponto de lançamento. ....	69
Figura 5.36 - Variação do $D_{50}$ com a concentração a 1,60 m do ponto de lançamento. ....	70
Figura 5.37 - Variação do $D_{50}$ com a vazão a 1,60 m do ponto de lançamento. ....	70
Figura 5.38 - Variação do $D_{50}$ com a concentração no ponto inicial de lançamento. ....	70
Figura 5.39 - Variação do $D_{50}$ com a vazão no ponto inicial de lançamento. ....	71
Figura 5.40 - Variação do $D_{10}$ para Q = 10 l/min e C entre 10,98 e 18,71%. ....	71
Figura 5.41 - Variação do $D_{10}$ para Q = 15 l/min e C entre 10,53 e 27,44%. ....	72
Figura 5.42 - Variação do $D_{10}$ para Q = 20 l/min e C entre 25,86 e 38,56%. ....	72
Figura 5.43 - Variação do $D_{10}$ para Q = 30 l/min e C entre 29,12 e 34,36%. ....	72
Figura 5.44 - Variação do $D_{10}$ para C = 10% e vazões entre 10,15 e 14,89 l/min. ....	73
Figura 5.45 - Variação do $D_{10}$ para C = 15% e vazões entre 9,77 e 16,16 l/min. ....	73
Figura 5.46 - Variação do $D_{10}$ para C = 25% e vazões entre 15,15 e 21,34 l/min. ....	73
Figura 5.47 - Variação do $D_{10}$ para C = 30% e vazões entre 22,06 e 32,43 l/min. ....	74
Figura 5.48 - Variação do $D_{10}$ para C = 35% e vazões entre 21,20 e 30,77 l/min. ....	74
Figura 5.49 - Variação do $\gamma_s$ para uma Q próxima a 10 l/min e C entre 10,98 e 18,71%. ....	76
Figura 5.50 - Variação do $\gamma_s$ para uma Q próxima a 15 l/min e C entre 10,53 e 27,44%. ....	76
Figura 5.51 - Variação do $\gamma_s$ para uma Q próxima a 20 l/min e C entre 25,86 e 38,56%. ....	76
Figura 5.52 - Variação do $\gamma_s$ para uma Q próxima a 30 l/min e C entre 29,12 e 34,36%. ....	77
Figura 5.53 - Variação do $\gamma_s$ para uma C próxima a 10% e Q entre 10,15 e 14,89 l/min. ....	77

Figura 5.54 - Variação do $\gamma_s$ para uma C próxima a 15% e Q entre 9,77 e 16,16 l/min. ....	77
Figura 5.55 - Variação do $\gamma_s$ para uma C próxima a 25% e Q entre 15,15 e 21,34 l/min. ....	78
Figura 5.56 - Variação do $\gamma_s$ para uma C próxima a 30% e Q entre 22,06 e 32,43 l/min. ....	78
Figura 5.57 - Variação do $\gamma_s$ para uma C próxima a 35% e Q entre 21,20 e 30,77 l/min. ....	78
Figura 5.58 - Variação do $\gamma_s$ com a concentração a 0,80 m do ponto de lançamento. ....	79
Figura 5.59 - Variação do $\gamma_s$ com a vazão a 0,80 m do ponto de lançamento. ....	79
Figura 5.60 - Variação do $\gamma_s$ com a concentração a 1,60 m do ponto de lançamento. ....	80
Figura 5.61 - Variação do $\gamma_s$ com a vazão a 1,60 m do ponto de lançamento. ....	80
Figura 5.62 - Variação do $\gamma_s$ com a concentração no ponto inicial de lançamento. ....	81
Figura 5.63 - Variação do $\gamma_s$ com a vazão no ponto inicial de lançamento. ....	81
Figura 5.64 - Variação do $\gamma_d$ para uma Q próxima a 10 l/min e C entre 10,98 e 18,71%. ....	82
Figura 5.65 - Variação do $\gamma_d$ para uma Q próxima a 15 l/min e C entre 10,53 e 27,44%. ....	82
Figura 5.66 - Variação do $\gamma_d$ para uma Q próxima a 20 l/min e C entre 25,96 e 38,56%. ....	83
Figura 5.67 - Variação do $\gamma_d$ para uma Q próxima a 30 l/min e C entre 29,12 e 34,36%. ....	83
Figura 5.68 - Variação do $\gamma_d$ para uma C próxima a 10% e Q entre 10,15 e 14,89 l/min. ....	83
Figura 5.69 - Variação do $\gamma_d$ para uma C próxima a 15% e Q entre 9,77 e 16,16 l/min. ....	84
Figura 5.70 - Variação do $\gamma_d$ para uma C próxima a 25% e Q entre 15,15 e 21,34 l/min. ....	84
Figura 5.71 - Variação do $\gamma_d$ para uma C próxima a 30% e Q entre 22,06 e 32,43 l/min. ....	84
Figura 5.72 - Variação do $\gamma_d$ para uma C próxima a 35% e Q entre 21,20 e 30,77 l/min. ....	85
Figura 5.73 - Variação do $\gamma_d$ com a concentração no ponto inicial de lançamento. ....	86
Figura 5.74 - Variação do $\gamma_d$ com a vazão no ponto inicial de lançamento. ....	86
Figura 5.75 - Variação do $\gamma_d$ com a concentração a 1,00 m do ponto de lançamento. ....	86
Figura 5.76 - Variação do $\gamma_d$ com a vazão a 1,00 m do ponto de lançamento. ....	87
Figura 5.77 - Variação do $\gamma_d$ com a concentração a 2,00 m do ponto de lançamento. ....	87
Figura 5.78 - Variação do $\gamma_d$ com a vazão a 2,00 m do ponto de lançamento. ....	87
Figura 5.79 - Variação do Índice de Vazios para Q = 10 l/min e C entre 10,98 e 18,71%. ....	88
Figura 5.80 - Variação do Índice de Vazios para Q = 15 l/min e C entre 10,53 e 27,44%. ....	89
Figura 5.81 - Variação do Índice de Vazios para Q = 20 l/min e C entre 25,86 e 38,56%. ....	89
Figura 5.82 - Variação do Índice de Vazios para Q = 30 l/min e C entre 29,12 e 34,36%. ....	89
Figura 5.83 - Variação do Índice de Vazios para C = 10% e Q entre 10,15 e 14,89 l/min. ....	90
Figura 5.84 - Variação do Índice de Vazios para C = 15% e Q entre 9,77 e 16,16 l/min. ....	90
Figura 5.85 - Variação do Índice de Vazios para C = 25% e Q entre 15,15 e 21,34 l/min. ....	90
Figura 5.86 - Variação do Índice de Vazios para C = 30% e Q entre 22,06 e 32,43 l/min. ....	91
Figura 5.87 - Variação do Índice de Vazios para C = 35% e Q entre 21,20 e 30,77 l/min. ....	91
Figura 5.88 - Variação da k para uma Q próxima a 10 l/min e C entre 10,98 e 18,71%. ....	92
Figura 5.89 - Variação da k para uma Q próxima a 15 l/min e C entre 10,53 e 27,44%. ....	93
Figura 5.90 - Variação da k para uma Q próxima a 20 l/min e C entre 25,86 e 38,56%. ....	93
Figura 5.91 - Variação da k para uma Q próxima a 30 l/min e C entre 29,12 e 34,36%. ....	93
Figura 5.92 - Variação da k para uma C próxima a 10% e Q entre 10,15 e 14,89 l/min. ....	94
Figura 5.93 - Variação da k para uma C próxima a 15% e Q entre 9,77 e 16,16 l/min. ....	94
Figura 5.94 - Variação da k para uma C próxima a 25% e Q entre 15,15 e 21,34 l/min. ....	94
Figura 5.95 - Variação da k para uma C próxima a 30% e Q entre 22,06 e 32,43 l/min. ....	95
Figura 5.96 - Variação da k para uma C próxima a 35% e Q entre 21,20 e 30,77 l/min. ....	95
Figura A.1 - Curvas granulométricas dos pontos amostrados ao longo do depósito para o ensaio C10Q10. ....	105

Figura A.2 - Curvas granulométricas dos pontos amostrados ao longo do depósito para o ensaio C10Q15.....	105
Figura A.3 - Curvas granulométricas dos pontos amostrados ao longo do depósito para o ensaio C15Q10.....	106
Figura A.4 - Curvas granulométricas dos pontos amostrados ao longo do depósito para o ensaio C15Q15.....	106
Figura A.5 - Curvas granulométricas dos pontos amostrados ao longo do depósito para o ensaio C25Q15.....	107
Figura A.6 - Curvas granulométricas dos pontos amostrados ao longo do depósito para o ensaio C25Q20.....	107
Figura A.7 - Curvas granulométricas dos pontos amostrados ao longo do depósito para o ensaio C30Q20.....	108
Figura A.8 - Curvas granulométricas dos pontos amostrados ao longo do depósito para o ensaio C30Q30.....	108
Figura A.9 - Curvas granulométricas dos pontos amostrados ao longo do depósito para o ensaio C35Q20.....	109
Figura A.10 - Curvas granulométricas dos pontos amostrados ao longo do depósito para o ensaio C35Q30.....	109

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA</b>	<b>PÁGINA</b>
Tabela 1.1 - Principais processos do meio ambiente passíveis de alteração negativa pelas atividades de mineração. ....	2
Tabela 3.1 - Aterros hidráulicos no Brasil construídos pela Light e Power Co. (modificado - RIBEIRO, 2000).....	25
Tabela 4.1 - Resumo dos ensaios realizados no ESDH.....	47
Tabela 4.2 - Características do rejeito da Mina do Morro do Ouro. ....	51
Tabela 5.1 - $D_{90}$ em diferentes pontos do depósito. ....	62
Tabela 5.2 - $D_{50}$ em diferentes pontos do depósito. ....	65
Tabela 5.3 - $D_{10}$ em diferentes pontos do depósito. ....	71
Tabela 5.4 - Peso específico dos grãos em diferentes pontos do depósito.....	75
Tabela 5.5 - Peso específico seco em diferentes pontos do depósito.....	82
Tabela 5.6 - Índice de vazios em diferentes pontos do depósito.....	88
Tabela 5.7 - Permeabilidade em diferentes pontos do depósito.....	92

## LISTA DE ABREVIACÕES, NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS

### SÍMBOLO

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
Ag	- Prata
C	- Concentração da mistura (%)
cm	- Centímetro
Cu	- Cobre
CVRD	- Companhia Vale do Rio Doce
D	- Diâmetro da amostra na câmara
D <sub>10</sub>	- Diâmetro efetivo
D <sub>50</sub>	- Diâmetro médio das partículas
D <sub>90</sub>	- Diâmetro correspondente à passagem de 90% das partículas
e	- Índice de Vazios
ESDH	- Equipamento de Simulação de Deposição Hidráulica
EUA	- Estados Unidos da América
g	- Grama
h	- Altura de lançamento
H	- Altura do talude da praia
H <sub>1,2</sub>	- Carga piezométrica no tempo t <sub>1,2</sub>
i	- Inclinação média da praia
k	- Permeabilidade
k <sub>h</sub>	- Permeabilidade horizontal no solo
k <sub>v</sub>	- Permeabilidade vertical no solo
kg	- Quilograma
km	- Quilômetro
kN	- QuiloNewton
l	- Litro
L	- Comprimento da praia / Comprimento da amostra
m	- Metro
<i>m</i>	- Razão de transformação $m = (k_h/k_v)^{(1/2)}$
min	- Minuto

ml	- Mililitro
mm	- Milímetro
m <sup>2</sup>	- Metro quadrado
m <sup>3</sup>	- Metro cúbico
MBT	- Mercaptobenzotiazol
NE	- Nordeste
Pb	- Chumbo
Q	- Vazão
rpm	- Rotação por minuto
RPM	- Rio Paracatu Mineração
s	- Segundo
SW	- Sudoste
t <sub>1,2</sub>	- Tempo
ton	- Tonelada
W <sub>s</sub>	- Peso de sedimentos
W <sub>t</sub>	- Peso total
Zn	- Zinco
μm	- Micrometro
γ <sub>d</sub>	- Peso específico seco
γ <sub>s</sub>	- Peso específico dos grãos



## INTRODUÇÃO

### 1.1. CONTEXTO GERAL

O processo de extração mineral no Brasil possui um destaque altamente representativo no cenário econômico mundial. Para que a atividade de mineração apresente uma sustentabilidade nos mais diversos segmentos, como a manutenção de custos de mercado mais atrativos e atenda as exigências relativas às legislações ambientais pertinentes no país, faz-se necessário um aprimoramento e um monitoramento constante de todo o fluxo da atividade mineral.

Observa-se que as operações necessárias para a realização das atividades de mineração podem acarretar alterações significativas ao meio ambiente, as quais, dependendo de sua importância, podem constituir impactos ambientais negativos. Os principais processos de alteração do meio físico, biótico e antrópico, passíveis de alteração negativa pelas operações das fases de instalação e funcionamento da mineração, podem ser vistos na Tabela 1.1.

Tomando-se por base as alterações do meio físico, os conceitos empregados pela geotecnia tendem a estabelecer um maior grau de segurança para este tipo de atividade e requerem uma atenção especial, em virtude da heterogeneidade de material, das atividades de lavra e geração de rejeitos. Contudo, as diferenças nas diversas áreas e formas de exploração tendem a dificultar o monitoramento de algumas etapas do processo de produção mineral e principalmente o controle da disposição do rejeito.

Os impactos ambientais negativos associados à disposição de rejeitos representam um passivo ambiental na atividade de extração mineral considerando principalmente o volume de rejeitos gerados bem como as extensas áreas destinadas sua estocagem. Além disso, a ocorrência de grandes acidentes relacionada a estruturas de contenção de rejeitos, no Brasil e no mundo, tem aumentado às exigências quanto ao controle de segurança dos sistemas de deposição de rejeitos.

De uma forma geral, os rejeitos exibem características mineralógicas, geotécnicas e físico-químicas bastantes variáveis, tanto em função do tipo de minério explorado quanto do próprio processo de beneficiamento. Essas condicionantes geram dificuldades na obtenção de parâmetros físicos representativos, interferindo diretamente no controle do material e na estabilidade e segurança dos sistemas de disposição de rejeitos.

Tabela 1.1 - Principais processos do meio ambiente passíveis de alteração negativa pelas atividades de mineração.

<b>Segmento do meio ambiente</b>	<b>Processo ou fator considerado</b>
Meio Físico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erosão pela água</li> <li>• Deposição de sedimentos ou partículas</li> <li>• Inundação</li> <li>• Escorregamento</li> <li>• Movimento de bloco</li> <li>• Movimentação das águas em sub-superfície</li> <li>• Escoamento das águas em superfície</li> <li>• Interações físico-químicas e bacterianas no solo e nas águas superficiais e subterrâneas</li> <li>• Erosão eólica</li> <li>• Circulação de partículas sólidas e gases na atmosfera</li> <li>• Propagação de ondas sonora</li> <li>• Propagação de sismos</li> <li>• Degradação de áreas</li> </ul>
Meio Biótico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desenvolvimento da vegetação</li> <li>• Desenvolvimento da fauna</li> </ul>
Meio Antrópico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trânsito</li> <li>• Percepção ambiental</li> </ul>

Uma das formas comuns de disposição dos resíduos gerados pelo beneficiamento mineral é a utilização de áreas com a formação de barragens de rejeitos em seu entorno. Em geral, tem-se uma preferência por esta forma de disposição, onde a técnica de aterro hidráulico é amplamente utilizada. O procedimento adotado nesta técnica impõe o lançamento de um material na forma de polpa, constituído basicamente por resíduos minerais e líquidos, gerados durante a fase de beneficiamento, que acabam por gerar uma variabilidade geotécnica muito grande no local de deposição. Além disso, os projetos de disposição de rejeitos por meio desta técnica, de uma

forma geral, ainda apresentam um baixo controle geotécnico, onde as características pertinentes ao material depositado refletem as deficiências das especificações técnicas que praticamente inexistem na fase de concepção e/ou durante o período de construção.

No intuito de estabelecer uma avaliação mais criteriosa relativa à concepção dos sistemas de disposição de rejeitos sob a forma de aterro hidráulico, o presente trabalho consiste em avaliar o processo de deposição hidráulica de um rejeito de mineração de ouro, proveniente da Mina do Morro do Ouro em Paracatu - Minas Gerais.

## **1.2. OBJETIVOS**

Considerando a importância da análise do comportamento dos sistemas de disposição de rejeitos, a proposta deste trabalho é promover uma caracterização geotécnica de um rejeito de mineração de ouro submetido a um processo de deposição hidráulica. Neste sentido, o comportamento deste rejeito será avaliado a partir de simulações realizadas no Equipamento de Simulação de Deposição Hidráulica (ESDH), desenvolvido por RIBEIRO (2000), para diferentes níveis de vazão e concentração.

Convém ressaltar, que durante as simulações, em função dos diferentes valores de concentração e vazão adotados, serão realizadas análises do comportamento do depósito considerando a geometria do aterro formado, a segregação granulométrica, a densidade e a permeabilidade em função da distância do ponto de lançamento. Por meio destes estudos, propõe-se estabelecer uma análise qualitativa do processo de disposição destes rejeitos bem como gerar parâmetros para posteriores análises de estabilidade da estrutura a ser formada em campo.

## **1.3. ESCOPO DA DISSERTAÇÃO**

A estrutura básica do presente trabalho encontra-se dividida em seis capítulos e um apêndice, conforme descritos a seguir.

O Capítulo 1 apresenta um contexto geral sobre a atividade de mineração no que diz respeito aos principais impactos ambientais negativos ocasionados pela atividade mineral, dando-se ênfase à

forma de disposição dos rejeitos por meio da técnica de aterro hidráulico. Num segundo momento faz-se a descrição do objetivo desta dissertação de mestrado e descreve-se o escopo da mesma.

No intuito de promover um conhecimento mais abrangente da atividade de mineração voltada para o tratamento de minérios, o Capítulo 2 descreve as principais etapas utilizadas durante o processo de beneficiamento de ouro. Esta abordagem visa fornecer um entendimento de como o rejeito é gerado, a partir do fracionamento do material sólido, desde a fase de lavra até a obtenção do produto final.

No Capítulo 3 é apresentada uma revisão bibliográfica pertinente às barragens de rejeitos formadas pela técnica de aterros hidráulicos, onde procura-se abordar os principais aspectos inerentes a esta forma de disposição de resíduos minerais, como: processos de formação, concepções físicas adotadas, parâmetros geotécnicos usuais e métodos construtivos.

A descrição dos materiais utilizados e da metodologia adotada para avaliação do comportamento do rejeito de ouro encontra-se no Capítulo 4. Os aspectos relacionados à potencialidade do Equipamento de Simulação e Deposição Hidráulica também estão descritos neste capítulo.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos nas simulações realizadas no ESDH bem como as análises destes resultados. As discussões sobre as principais características do depósito relacionadas à geometria das praias formadas, segregação hidráulica, densidade e permeabilidade também são mencionadas neste capítulo.

O Capítulo 6 menciona as conclusões obtidas sobre esta dissertação e propõe algumas sugestões para pesquisas futuras.

Por fim, o Apêndice A reúne as curvas granulométricas obtidas das simulações realizadas no Equipamento de Simulação e Deposição Hidráulica.

### A ATIVIDADE DE MINERAÇÃO E O BENEFICIAMENTO MINERAL DO OURO

#### 2.1. INTRODUÇÃO

Entende-se por atividade de mineração aquela caracterizada fundamentalmente pela pesquisa e exploração de recursos minerais úteis, que se encontrem no solo ou subsolo. CHAMMAS (1989) define mineração como um complexo de atividades necessárias à extração econômica de bens minerais da crosta terrestre, provocando transformações no meio ambiente. A lavra constitui-se no conjunto de atividades coordenadas que extraem um bem mineral, objetivando o seu aproveitamento industrial ou uso direto. Na lavra são produzidos resíduos minerais chamados de estéreis, provenientes do decape da mina. Já os processos de beneficiamento ou tratamento de minérios são aqueles que envolvem separações físicas e químicas, visando à obtenção da substância mineral de interesse. Nesta etapa são produzidos também os resíduos minerais denominados rejeitos. Em linhas gerais pode-se dizer que ao longo da atividade de mineração são obtidos os estéreis, o produto final e os rejeitos.

O produto final, que é a substância de interesse da mineradora, se encontra vinculado à natureza de cada mineração, tendo como base a pesquisa mineral realizada, o plano de lavra estabelecido e o tratamento submetido ao minério. Todo processo, tanto de lavra como de beneficiamento, tem por objetivo gerar produtos que satisfaçam à qualidade exigida pelo mercado consumidor. Há que se contemplar também fatores que influenciam no produto final, como as condições de logísticas, parâmetros adotados nas usinas de beneficiamento, tipo de minério, dentre outros.

A mineração é sem dúvida um fator importante no desenvolvimento de um país, tanto gerando riquezas quanto contribuindo para a formação e progresso de diversas regiões. No Brasil, o ciclo do ouro foi responsável por boa parte da ocupação e desenvolvimento do estado de Minas Gerais. Se hoje Minas Gerais ostenta a condição de estado industrial, com certeza deve à atividade mineral. Todo o Quadrilátero Ferrífero teve seu desenvolvimento calcado na mineração, na época do Brasil Colônia, explorando ouro e diamantes, e posteriormente minérios de ferro e outros minerais.

## 2.2. ETAPAS DO PROCESSO DE EXTRAÇÃO MINERAL

O desenvolvimento da exploração mineral se dá, basicamente, por intermédio de duas fases: o processo de lavra do material de interesse e a etapa de beneficiamento do mesmo.

Para a primeira fase, dependendo da viabilidade técnica e econômica imposta pelas análises da geologia, a lavra pode ser feita a céu aberto (direto na superfície da região de exploração) e/ou subterrânea (galerias situadas abaixo do nível natural da área a ser explorada). As Figuras 2.1 e 2.2 ilustram estes dois tipos de lavras.



Figura 2.1 - Exemplo de lavra a céu aberto da Mina de Rio Tinto na Espanha.

(FONTE: Rio Tinto Company, 1983)

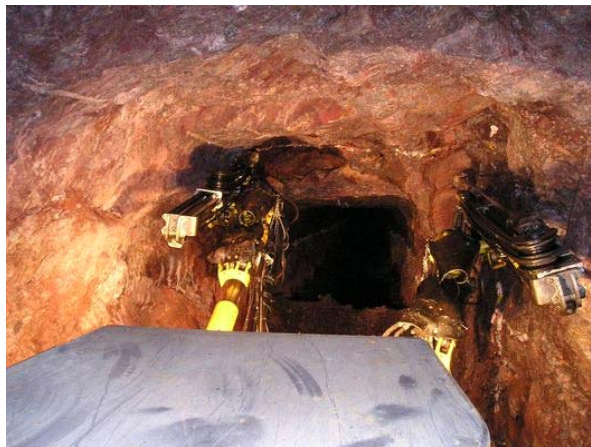


Figura 2.2 - Exemplo de lavra subterrânea mostrando um jumbo operando no alargamento da galeria de transporte - Mina de João Belo - BA.

(FONTE: Jacobina Mineração e Comércio Ltda, 2002)

A etapa de beneficiamento mineral depende do tipo de material que está sendo explorado e da concepção do produto final a ser comercializada em termos de pureza, granulometria, forma, dentre outros. Esta atividade envolve processos físicos e químicos, como britagem, moagem, ciclonagem, flotação, espessamento etc. A Figura 2.3 apresenta uma vista geral de uma usina de beneficiamento.



Figura 2.3 - Vista da usina de beneficiamento da Mina de Barro Alto - GO.

(FONTE: Anglo American, 2003)

## **2.3. BENEFICIAMENTO DE MINÉRIOS DE OURO**

O beneficiamento de minérios de ouro apresenta algumas peculiaridades que o diferenciam de outros métodos de tratamento. O elemento submetido ao processo de beneficiamento é um elemento químico em sua forma natural metálica, caracterizado por possuir elevada densidade e maleabilidade. De uma forma geral, as rotas de processamento podem se restringir a uma mera adequação granulométrica do minério às etapas hidrometalúrgicas subsequentes ou envolver, além da preparação, estágios de concentração. Para esta última situação, as propriedades diferenciadoras exploradas são a diferença de densidade e de hidrofobicidade entre o ouro e os minerais a ele associados mais intimamente e os minerais de ganga.

### **2.3.1. Etapas de Preparação no Beneficiamento de Minérios de Ouro**

#### **2.3.1.1. Britagem**

Inicialmente, o minério que chega proveniente da frente de lavra passa por uma etapa de

britagem, onde o material sofre uma desagregação brusca. Essa britagem primária pode ser realizada tanto em britadores de mandíbulas de dois eixos quanto em britadores de impacto (CHAVES & PERES, 1999).

A Figura 2.4 apresenta um corte longitudinal de um britador de mandíbulas de dois eixos. Para esse tipo de britador os elementos mecânicos ativos consistem de uma placa metálica móvel e uma placa metálica fixa. A placa móvel se movimenta de modo reccivo em torno de um eixo excêntrico de forma a se aproximar e afastar em um certo intervalo de tempo da placa fixa. À distância entre as duas mandíbulas na extremidade superior do britador é designada como “gap”. O fragmento de rocha ou minério a ser britado é introduzido no espaço entre as duas mandíbulas e, durante o movimento de aproximação, é esmagado. Os fragmentos resultantes escoam para baixo, durante o movimento de afastamento, cada qual se deslocando até uma posição em que fique contido pelas mandíbulas e seja novamente esmagado na aproximação seguinte da mandíbula móvel. O movimento é gerado por um outro eixo, excêntrico, que aciona uma biela. Esta biela está ligada a duas placas rígidas de metal, chamadas abanadeiras. Como a mandíbula móvel está presa pelo eixo cêntrico, seu movimento percorre um arco de círculo, aproximando e afastando a sua extremidade inferior da mandíbula fixa. A mandíbula móvel, as abanadeiras e a biela são mantidas solidárias por um tirante, que é aparafusado à carcaça do britador.

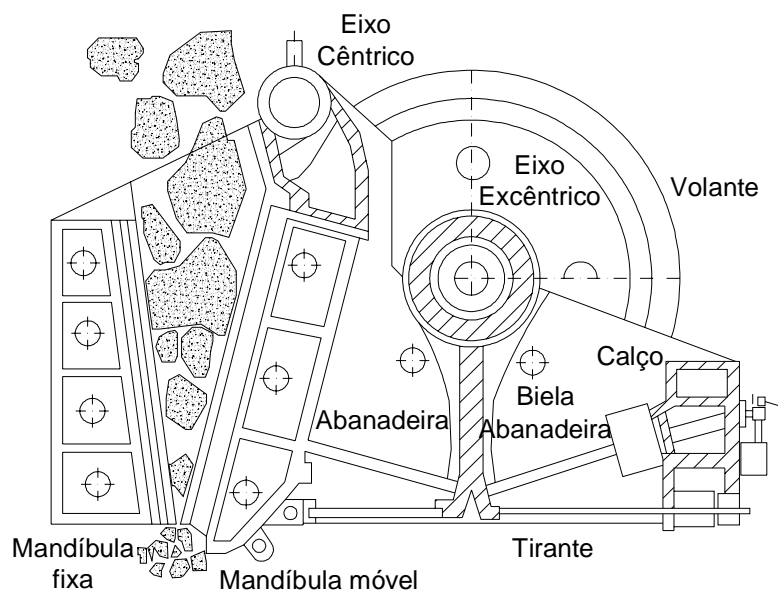


Figura 2.4 - Britador de mandíbula de dois eixos. (modificado - CHAVES & PERES, 1999)



Os britadores convencionais de impacto se caracterizam por terem desgaste elevado e por isto estão limitados a materiais não abrasivos. Apresentam menor investimento de capital e maior rendimento energético. A ação mecânica é o impacto dos martelos ou barras de impacto sobre as partículas e a transformação de sua energia cinética em fratura. A carcaça é projetada especialmente de forma a fragmentar as partículas impactadas contra a mesma. A descarga é livre e a câmara é grande, para permitir a movimentação das partículas e passagem de blocos de grandes dimensões. Em alguns modelos a posição das barras de impacto pode ser ajustada horizontalmente, de forma a regular a granulometria do produto. A Figura 2.5 ilustra o corte longitudinal de britador de impacto.

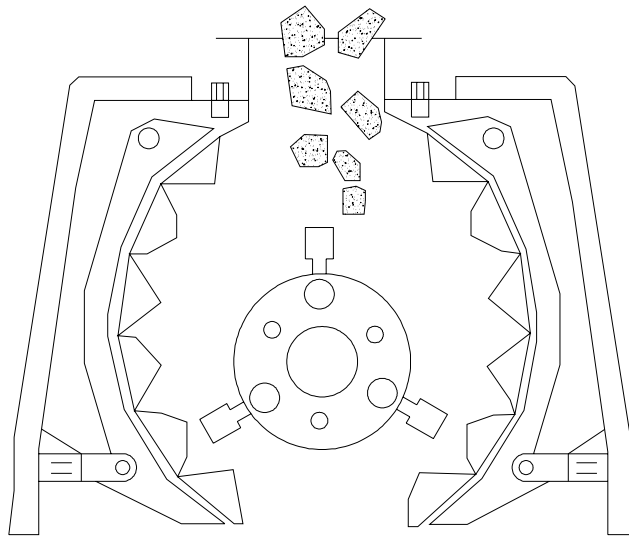


Figura 2.5 - Corte de um britador de impacto. (modificado - CHAVES & PERES, 1999)

Num segundo momento, no intuito de fracionar ainda mais o minério extraído, utilizam-se britagens secundárias e terciárias por meio de britadores cônicos (CHAVES & PERES, 1999). Os aparelhos usados na britagem secundária são designados como britador cônico ou cônico “standard”, os empregados na britagem terciária são mais curtos e de câmara mais fechada, sendo chamados de “short head”. A Figura 2.6 ilustra os cortes longitudinais do britador cônico “standard” e do britador “short head”.

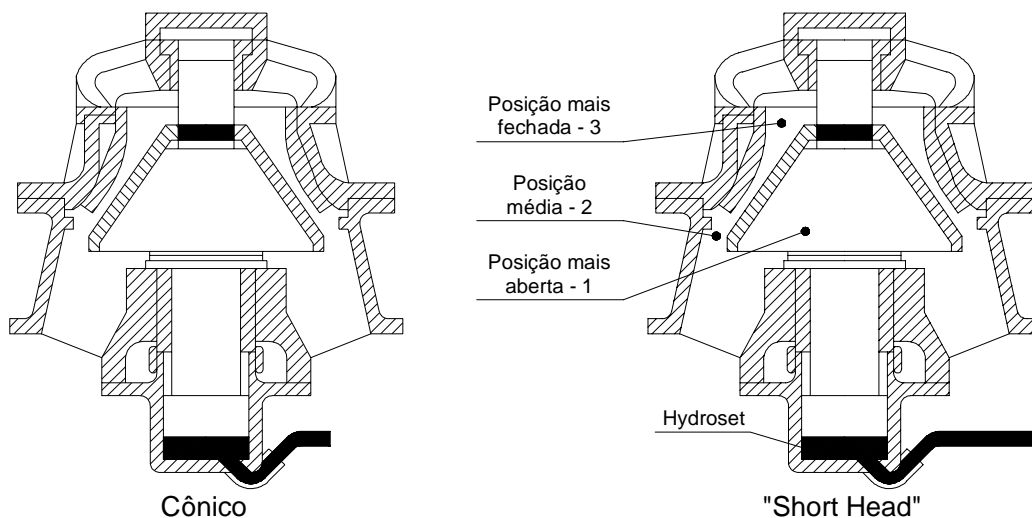


Figura 2.6 - Cortes de um britador cônico “standard” e de um “short head”.

(modificado - CHAVES & PERES, 1999)

### 2.3.1.2. Peneiramento

Ao longo das etapas de britagens dos minérios de ouro do Brasil são empregadas peneiras vibratórias convencionais, constituídas por um chassi robusto, apoiado em molas, um mecanismo acionador do movimento vibratório e um, dois ou três suportes para as telas (CHAVES e PERES, 1999). No peneiramento de partículas grosseiras é necessário revestir as paredes internas do chassi com placas de material resistente à abrasão. Quando se peneiram materiais contendo tamanhos variados numa malha de abertura pequena é muito conveniente à colocação de um anteparo de alívio ou proteção, com uma tela grossa e forte, que recebe o impacto e o esforço mecânico das partículas maiores. Durante a etapa de peneiramento as empresas de mineração utilizam dois tipos diferentes de peneiras: as vibratórias inclinadas e as horizontais. As peneiras vibratórias inclinadas possuem inclinações variando entre  $15^\circ$  e  $35^\circ$  e transportam o material do leito a uma velocidade de 18 a 36 m/mim, dependendo da inclinação. Por outro lado, as peneiras horizontais transportam o material à velocidade de 12 m/mim. As peneiras vibratórias inclinadas têm um movimento vibratório circular ou elíptico, que faz com que as partículas sejam lançadas para cima e para frente, de modo que possam se apresentar à tela várias vezes, sempre sobre

aberturas sucessivas. Este movimento vibratório causa a estratificação do conjunto de partículas sobre a tela, de modo que as maiores fiquem por cima e as menores por baixo.

### 2.3.1.3. Moagem

Como forma de minimizar ainda mais o tamanho das partículas para obtenção do elemento de interesse, utiliza-se, no Brasil, os moinhos de bolas (CHAVES & PERES, 1999), enquadrados na categoria de moinhos de carga cadente (Figura 2.7). Esses equipamentos são constituídos de um corpo cilíndrico que gira em torno do seu eixo. A carcaça é feita de chapa calandrada e soldada, com espessura entre 1/100 e 1/75 do diâmetro do moinho, fechada nas duas extremidades por peças de aço fundido chamadas: tampas, cabeças ou espelhos. São sempre revestidos internamente por material metálico ou de borracha resistente ao desgaste.

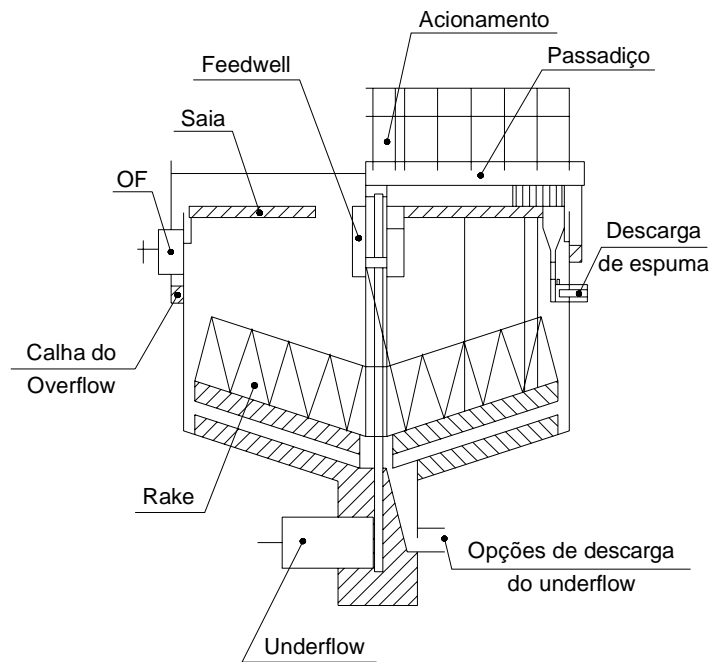


Figura 2.7 - Moinho de carga cadente. (modificado - CHAVES & PERES, 1999)

### 2.3.1.4. Classificação

A etapa de classificação consiste em separar uma população de partículas em duas outras populações sendo, uma com proporção significativamente maior de partículas grosseiras (“underflow”), e a outra com proporção significativamente maior de partículas finas (“overflow”)

(CHAVES et al, 1996). De um modo geral a classificação é executada com um dos seguintes objetivos: selecionar partículas suficientemente finas, portanto com elevado grau de liberação para alimentar o processo de concentração, especialmente a flotação e/ou promover o retorno das partículas mais grosseiras ao moinho de bolas. Além disso, um outro objetivo poderá ser a eliminação de partículas muito finas, nocivas à etapa subsequente. Essa operação é usualmente conhecida como deslamagem.

Durante décadas a classificação foi realizada em equipamentos denominados classificadores espirais, entretanto, há aproximadamente 50 anos, esses equipamentos tornaram em desuso passando a utilizar os hidrociclones, ou simplifiadamente, ciclones, invenção do “Dutch State Mines Departament” (Holanda). Esse equipamento é considerado nos dias de hoje como padrão para classificação fina, entre 850  $\mu\text{m}$  e 2  $\mu\text{m}$ . Como vantagens dos ciclones em relação aos classificadores espirais pode-se destacar que os ciclones possuem uma capacidade elevada em termos de volume ou área ocupada, facilidade de controle operacional, operação relativamente estável e entrada em regime em curto período de tempo, além disso, a manutenção é fácil e o investimento é baixo, permitindo a viabilização de unidades de reserva. Por outro lado, apresentam como desvantagens um custo operacional maior, devido à energia gasta no bombeamento, detém incapacidade de armazenar grande volume de polpa e, com isso, de ter efeito regulador, e, possui uma menor eficiência de classificação no processo de beneficiamento mineral. A Figura 2.8 ilustra uma visão geral de um hidrociclone típico.

A compreensão do funcionamento do ciclone fica facilitada a partir da análise de sua operação com água. A polpa de alimentação adquire um movimento circular, ou mais precisamente em escoamento rotacional, dentro da porção cilíndrica do ciclone. As únicas opções para a saída da água alimentada são o “apex” e o “vortex finder”. A maior parte da água sai pelo “vortex finder”, devido à sua maior seção. No interior do ciclone toda a água gira no mesmo sentido, mas parte dela tem uma componente vertical de velocidade descendente e se dirige para o “apex” (vórtice descendente) e a outra tem um sentido ascendente e se dirige para o “vortex finder” (vórtice ascendente). O movimento da massa fluida acarreta o aparecimento de uma pressão negativa que provoca sucção de ar para dentro do ciclone, através do “apex”, de modo que esse ar mistura-se ao vórtice ascendente e sai pelo “overflow”.

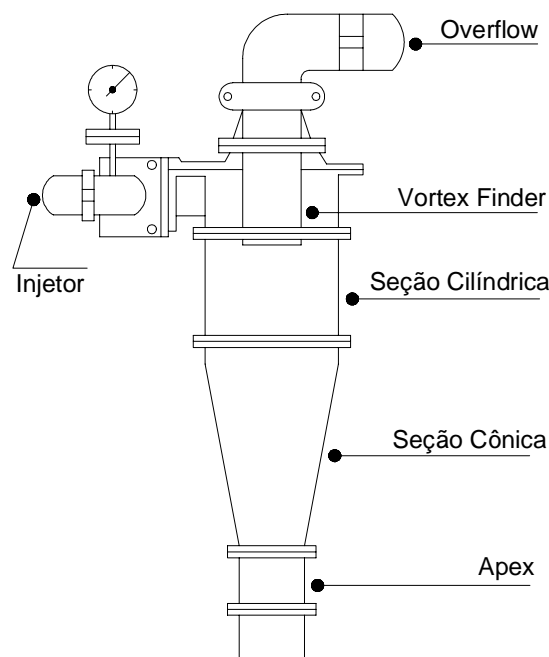


Figura 2.8 - Representação de um hidrociclone típico.  
(modificado - CHAVES et al, 1996)

Considerando a presença de partículas sólidas, o movimento circular gera uma força centrífuga que impele as partículas em direção às paredes do ciclone. As partículas ficam sujeitas à velocidade centrífuga que tende a arrastá-las em direção às paredes do ciclone e à velocidade vertical imposta pelo movimento da água dentro do ciclone no sentido descendente nas regiões próximas à periferia, onde a massa de polpa está sendo descarregada pelo “underflow”, e no sentido ascendente nas regiões centrais, onde a polpa está sendo descarregada pelo “overflow”. As partículas mais grosseiras têm massa maior e por isso afundam mais depressa no campo centrífugo, ocupando o volume do ciclone próximo às paredes. As partículas finas também tendem a serem projetadas em direção às paredes, mas como o espaço já está ocupado pelas partículas grosseiras são empurradas para o centro do ciclone. As partículas extremamente finas se incorporam ao meio líquido e se dividem entre “underflow” e “overflow”, de acordo com a participação de água entre esses fluxos.

### 2.3.2. Concentração Gravítica

A utilização do método mais adequado para o processamento de um minério de ouro é determinado por muitos fatores como a mineralogia dos minerais portadores de ouro e dos minerais de ganga, o tipo de padrão de liberação dos minerais portadores de ouro e o tamanho da partícula de ouro, entre outros (LINS, 2000). De uma forma geral, as partículas livres de ouro de tamanho maiores que 200  $\mu\text{m}$  podem ser recuperadas eficientemente por métodos denominados gravíticos. Quando o ouro está associado a sulfetos, o processamento usual inclui a cominuição do minério e subsequente liberação, seguida de uma etapa de flotação antes da cianetação. A concentração de minérios de ouro no Brasil é praticada por métodos gravíticos e por flotação. Os aparelhos mais empregados na separação gravítica de minérios de ouro são os jigues, as mesas vibratórias e os concentradores centrífugos.

#### 2.3.2.1. Jigue

O processo de jigagem é provavelmente o método gravítico de concentração mais complexo. Esta característica é devida as suas contínuas variações hidrodinâmicas. Nesse processo, a separação dos minerais de densidades diferentes é realizada em um leito dilatado por uma corrente pulsante de água, produzindo a separação dos minerais (LINS, 1998). A Figura 2.9 apresenta um esquema simplificado de um jigue.

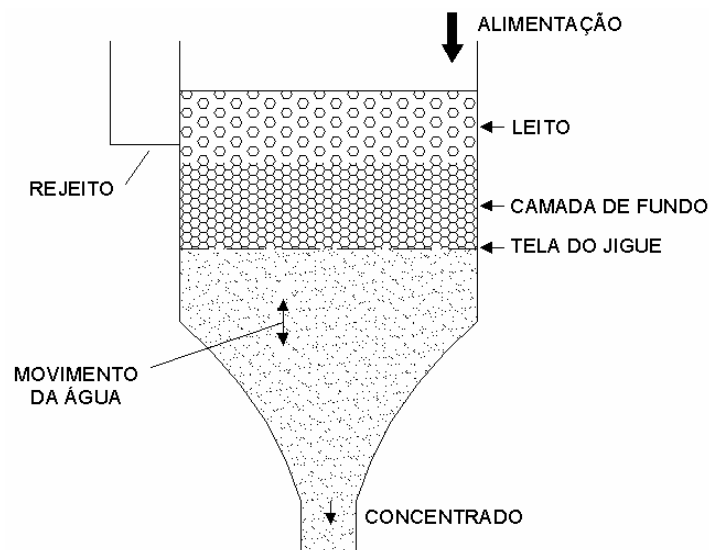


Figura 2.9 - Esquema simplificado de um jigue. (modificado - LINS, 1998)

Grande parte da estratificação supostamente ocorre durante o período em que o leito está aberto, dilatado, e resulta da sedimentação retardada, acentuada pela aceleração diferencial. Estes mecanismos colocam os grãos finos e/ou mais leves em cima e os grossos e/ou mais pesados no fundo do leito. A consolidação intersticial, durante a sucção, direciona as partículas finas/pesadas no fundo e as grossas/leves no topo do leito. Os efeitos de impulsão e sucção, quando ajustados adequadamente, resultam em uma estratificação quase perfeita, segundo a densidade dos minerais (LINS, 1998).

Uma variável importante neste processo é a água, que é introduzida sob a tela na arca do jig. Não deve haver alteração no fluxo da água, pois estas alterações tendem a perturbar as condições de concentração no leito do jig. É recomendável que as tubulações de água de processo para cada jig, ou mesmo para cada câmara do jig, sejam alimentadas separadamente a partir de um reservatório de água por gravidade.

#### **2.3.2.2. Mesa Vibratória**

A mesa vibratória ou oscilatória consiste de uma placa de madeira revestida de um material com alto coeficiente de fricção (borracha ou plástico), parcialmente coberta com ressaltos, inclinada e sujeita a um movimento assimétrico na direção dos ressaltos. Esta placa possui um mecanismo que provoca um aumento da velocidade no sentido da descarga do concentrado e uma reversão súbita no sentido contrário, diminuindo suavemente a velocidade no final do curso (LINS, 1998).

Os mecanismos de separação atuantes na mesa oscilatória podem ser melhor compreendidos se considerar separadamente a região da mesa com ressaltos e a região lisa. As partículas minerais, alimentadas transversalmente aos ressaltos, sofrem o efeito do movimento assimétrico da mesa, resultando em um deslocamento das partículas para frente; as pequenas e pesadas deslocando-se mais que as grossas e leves. Nos espaços entre os ressaltos, as partículas estratificam-se devido à dilatação causada pelo movimento assimétrico da mesa e pela turbulência da polpa através dos ressaltos, fazendo com que os minerais pesados e pequenos fiquem mais próximos à superfície que os grandes e leves. A Figura 2.10 apresenta um esquema simplificado de uma mesa vibratória.

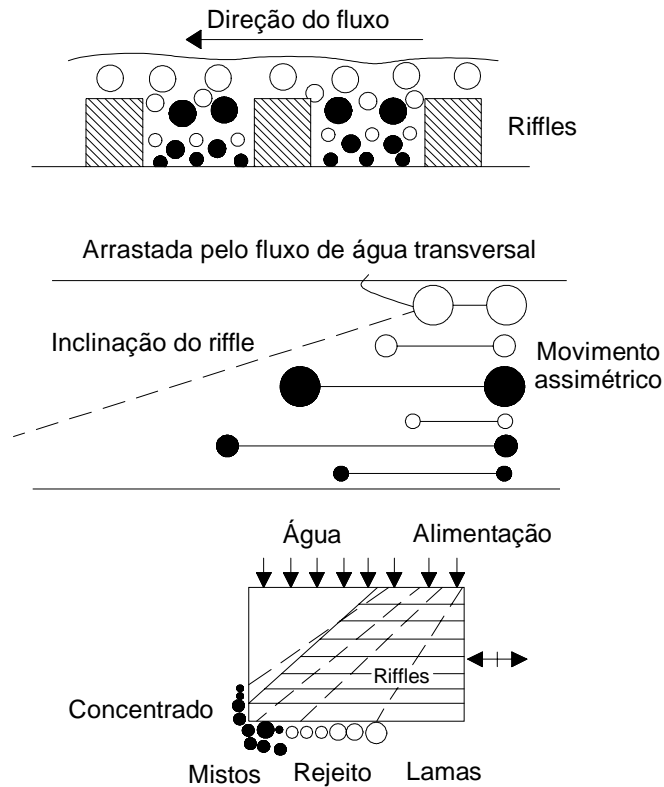


Figura 2.10 - Esquema simplificado de uma mesa vibratória.  
(modificado - LINS, 1998)

A mesa oscilatória é empregada há várias décadas, sendo um equipamento disseminado por todo o mundo para a concentração gravítica de vários tipos de minérios. É considerado de um modo geral o equipamento mais eficiente para o tratamento de materiais com granulometria fina. A limitação deste processo de separação é a baixa capacidade de processamento, menor que duas toneladas por hora, fazendo com que seu uso, particularmente com minérios de aluviões, se restrinja às etapas de limpeza. É um equipamento muito usado na limpeza de concentrado primário ou secundário de minérios de ouro livre.

No tratamento de minérios de granulometria muito fina, a mesa oscilatória opera com menor capacidade, menor que 500 kg por hora, sendo comum à colocação, após uma série de 6 a 10 “riffles”, de ripas de altura um pouco maior e mais larga para criar melhores condições de sedimentação; é a chamada mesa de lamas.



### **2.3.2.3. Concentradores Centrífugos**

A operação dos concentradores centrífugos se baseia no princípio de se aumentar o efeito gravitacional visando uma maior eficiência na recuperação de partículas finas. Estes concentradores surgiram no Canadá em substituição aos equipamentos rudimentares. Destacam-se no cenário mundial os concentradores centrífugos Knelson e Falcon, ambos canadenses.

### **2.3.3. Flotação**

A flotação é um método de separação entre partículas sólidas que explora diferenças superficiais baseadas no fato das mesmas apresentarem caráter polar (hidrofilicidade) ou apolar (hidrofobicidade). Segundo o princípio de afinidade entre espécies ambas polares ou ambas apolares, em uma máquina de flotação as entidades hidrofílicas seguem o fluxo de água e as hidrofóbicas aderem às bolhas de ar. As superfícies formadas de partículas de ouro puras e limpas são naturalmente hidrofílicas. Na prática, o ouro pode ser considerado um dos melhores exemplos de hidrofobicidade natural entre os sistemas de extração industrial (MARSDEN & HOUSE, 1992). Na maioria dos casos as partículas de ouro encontram-se na natureza intimamente associadas a alguns minerais, especialmente da família dos sulfetos, tais como arsenopirita, pirita, pirrotita e calcopirita.

#### **2.3.3.1. Flotação de Minérios de Ouro**

A aplicação da flotação como uma etapa no processamento de minérios de ouro pode ser assim classificada, considerando a interação com a mineralogia prevalente no minério (LINS, 2000):

- Flotação de minérios com partículas de ouro;
- Flotação de ouro associado com sulfetos:
  - ouro associado com pirita, pirrotita e arsenopirita;
  - ouro associado a minerais como calcopirita e bornita em minérios de cobre;
  - ouro associado com sulfetos de Cu, Pb, Ag, Zn;
- Flotação de ouro em sistemas mistos: parte do ouro ocorre como partículas de ouro nativo e parte associada a sulfetos.

De modo geral, o esquema de flotação aplicado aos minérios de ouro, com ouro associado a sulfetos ou não, visa a flotação conjunta de ouro e sulfetos. Essa prática se justifica, em parte, pela dificuldade inerente de separação seletiva entre ouro livre (partículas de ouro nativo liberadas dos sulfetos ou minerais de ganga) e os sulfetos de modo geral.

No Brasil, pelo menos três importantes minerações de ouro empregam a flotação, todas localizadas em Minas Gerais. Na usina São Bento, em Santa Bárbara, o ouro e a pirita são flotados juntos. Na operação da Morro Velho, em Raposos, o processamento do minério inclui uma etapa preliminar de flotação de ouro livre e grafita com mercaptobenzotiazol (MBT) em pH neutro, em uma etapa seguinte, a pirita contendo ouro é flotada com a adição de difosfato. A Rio Paracatu Mineração (RPM), em Paracatu, processa um minério de ouro contendo ouro livre e sulfetos (pirita e arsenopirita). O esquema de flotação nesse caso consta de tratar separadamente o *overflow* e o *underflow* do ciclone que classifica o produto da moagem. O *underflow* é concentrado por flotação com a adição de MBT (30 g/ton.) em pH 6-6,5. O *overflow* também, com a adição de MBT (10g/ton.), no mesmo pH. Após uma etapa de limpeza, os dois concentrados se juntam alimentando o circuito de cianetação.

#### **2.3.4. Fluxogramas de Beneficiamento de Ouro**

Os fluxogramas de beneficiamento mineral são ilustrações que apresentam a seqüência das etapas necessárias para obtenção do mineral de interesse. Duas empresas foram escolhidas para exemplificar por meio dos seus fluxogramas como funciona o processo de beneficiamento de ouro: a Companhia Vale do Rio Doce - CVRD, por ser a maior produtora de ouro no país, e a Rio Paracatu Mineração - RPM, por apresentar o fluxograma mais elaborado em termos de operações de concentração, que abrangem, além dos métodos gravíticos, a flotação, tanto em células mecânicas quanto a flotação unitária. A seguir, as Figuras 2.11 e 2.12 ilustram os fluxogramas de beneficiamento dos minérios de ouro extraído da Fazenda Brasileiro (CVRD) e da RPM, destacando a maioria das etapas de beneficiamento descritas anteriormente.

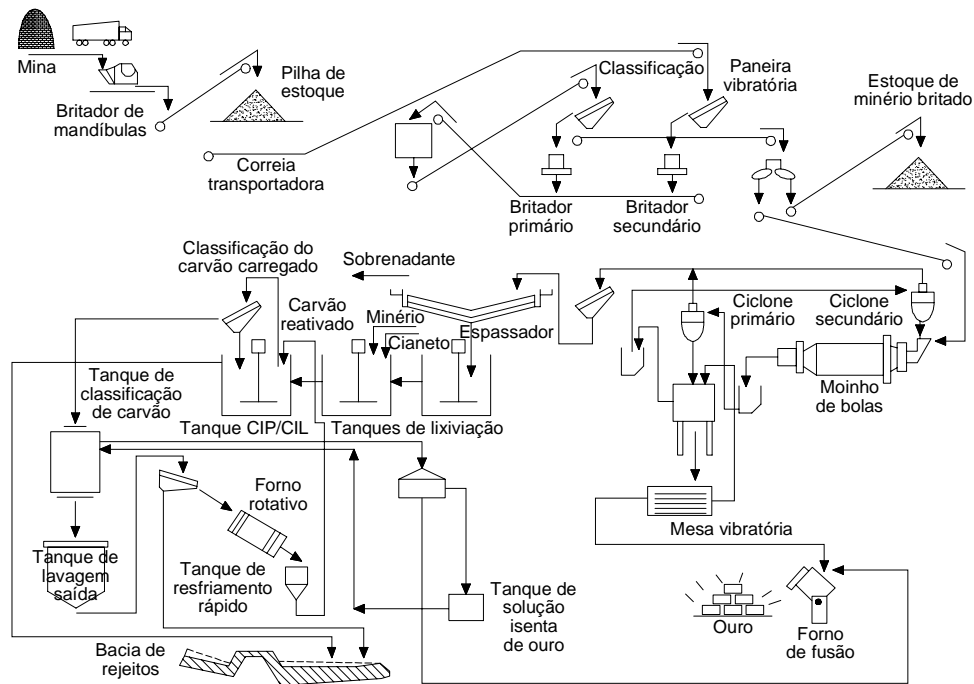


Figura 2.11 - Fluxograma do Beneficiamento do Minério de Ouro da Fazenda Brasileiro.  
(modificado - LINS, 1998)

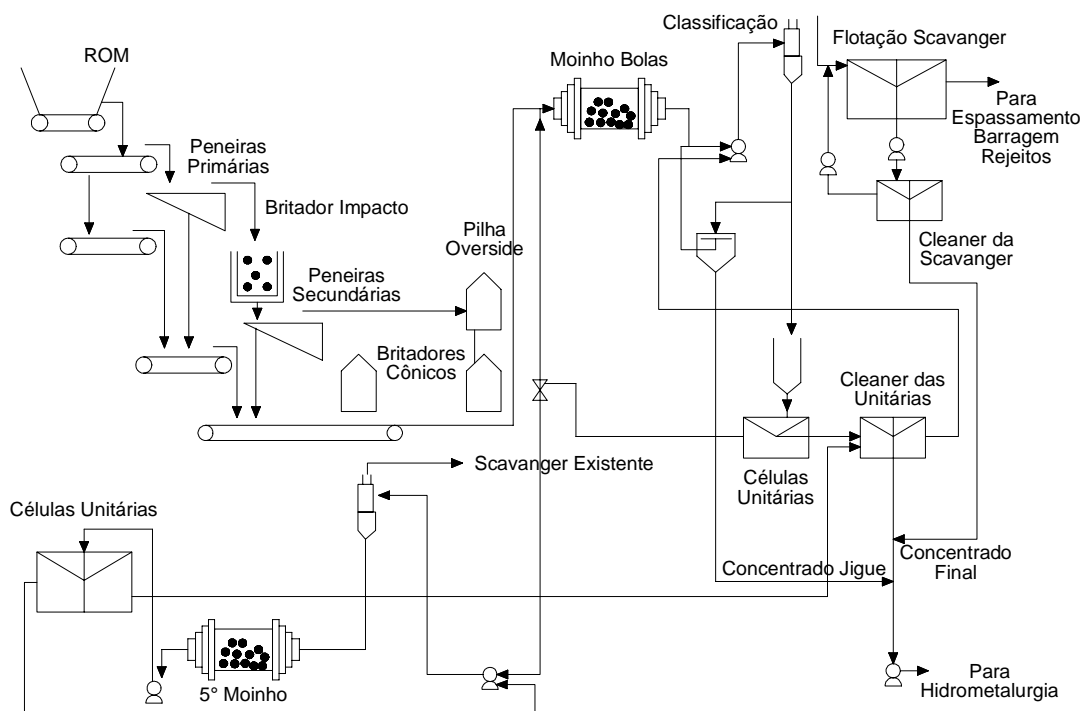


Figura 2.12 - Fluxograma do Beneficiamento do Minério de Ouro da RPM  
(modificado - LINS, 1998)

Ao término do beneficiamento mineral gera-se o produto, material de valor econômico explorado, e como consequência obtém-se um resíduo mineral usualmente conhecido como rejeito. Dando continuidade ao fluxo o produto tem um destino comercial e a disposição do material residual gerado apresenta destinações diferentes. As formas comuns de disposição de rejeitos são dadas através de preenchimentos de cavas e/ou galerias exauridas, fechamentos de descontinuidades utilizando o rejeito sob a forma de pasta e construção de barragens por meio da técnica de aterro hidráulico. Além disso, tem-se se tornado possível o aproveitamento destes materiais como matéria-prima para outras atividades.

Contudo, a forma mais usual de disposição se faz por meio de deposições hidráulicas. Esse tipo de solução associa-se aos processos de transporte, separação e deposição de sólidos juntamente com a presença de água e/ou outros fluidos inseridos na fase de beneficiamento. Os aterros hidráulicos consistem de obras geotécnicas em que a composição da mistura e o método de lançamento afetam diretamente os parâmetros físicos relacionados a esta estrutura. Sendo assim, faz-se necessário um estudo minucioso quanto ao comportamento apresentado por tais aterros, em virtude de se poder projetá-los de forma adequada e segura. A seguir, o Capítulo 3 dará um enfoque maior à técnica de disposição de rejeitos por meio de deposições hidráulicas.

### BARRAGENS DE REJEITOS

#### 3.1. INTRODUÇÃO

A disposição dos rejeitos de mineração tem se tornado um grande problema ambiental das atividades de mineração em função da exploração crescente de jazidas com baixos teores, tendo como consequência o aumento do volume de rejeitos gerados e a exigência de áreas maiores para sua deposição. Convém ressaltar, que fora o impacto visual na paisagem, com a destinação dos resíduos gerados pela mineração, o principal efeito ecológico normalmente é a poluição da água, considerando o despejo na água, de metais pesados dos sólidos, os reagentes utilizados no processo de beneficiamento, compostos de enxofre etc. Além disso, o risco de ruptura das estruturas que acomodam estes resíduos tem sido uma outra preocupação por parte da sociedade e dos órgãos ambientais por acarretarem destruição de cursos de água e vegetação natural, prejuízos econômicos e perda de vidas humanas.

Os métodos de disposição de rejeitos foram desenvolvidos a partir de entraves ambientais e mudanças nas práticas da mineração. Na fase inicial da extração mineral, alguns métodos de descarte de rejeitos incluíam a descarga direta nos rios e córregos e cursos de água ou despejo aleatório de material de diâmetros maiores diretamente na superfície. Entretanto, devido aos danos e riscos ambientais causados por estes métodos outras técnicas de deposição foram desenvolvidas.

GARGA & TRONCOSO (1990) consideram que com o aumento do controle ambiental e a pressão da opinião pública, torna-se necessário à elaboração de um projeto de disposição de rejeito designado não apenas para o estágio de operação da mina, mas também para o seu abandono. Assim, um sistema de disposição de rejeitos deve satisfazer aos requisitos de segurança, controle de contaminação, capacidade de armazenamento e economia. E como tal, deve estar fundamentada em critérios de projeto estabelecidos em função do tipo de rejeito, dos

contaminantes naturais, da disposição de materiais de construção e das interferências no meio ambiente (CHAMMAS, 1989).

A elaboração de projetos, a operação e a manutenção das barragens de rejeitos existentes têm possibilitado o desenvolvimento e o aprimoramento de soluções para a disposição dos resíduos minerais. Ressalta-se que é economicamente vantajoso situar o armazenamento do rejeito perto da mina, entretanto, esta imposição fica limitada à seleção de locais nas proximidades. A área subjacente à barragem deve ter resistência estrutural e suportar o seu peso próprio

Nos sistemas de disposição de rejeitos por meio de barragens, existem poucas alternativas de construção quando comparadas com as barragens tradicionais de acumulação de água, devido principalmente à viabilidade técnico-econômica das operações existentes no setor mineral. Durante o processo de beneficiamento de minérios, os rejeitos são produzidos na forma de polpa, cujo meio de transporte mais viável e econômico é por via hidráulica. Assim, o método de aterro hidráulico é naturalmente atrativo e vantajoso para construir estruturas de retenção de rejeitos. Neste sentido, considerando a aplicabilidade da técnica de aterro hidráulico tem-se aumentado o volume de pesquisas no sentido de aumentar a viabilidade e confiança na utilização deste sistema de disposição de rejeitos (ESPÓSITO, 2000; LOPES, 2000 & RIBEIRO, 2000).

Problemas associados à erosão de barragens de rejeitos devido às ações do vento e chuva podem afetar a estabilidade global da estrutura e, conseqüentemente, produzir problemas ambientais. Contudo, muitos métodos são usados no intuito de combater esse fenômeno, como a plantação de vegetação nas proximidades das barragens. Sendo assim, muitas barragens de rejeitos estão sendo projetadas permitindo integrações visuais com o meio ambiente. Um exemplo típico dessa situação são os fechamentos propostos por Flambeau, norte de Wisconsin, EUA, onde o talude da barragem possui 18 m de altura e 24 m de largura na base, tendo sido projetado para minimizar os efeitos visuais e da poluição. A Figura 3.1 exemplifica esta situação, ilustrando a presença de vegetação como forma de combater a erosão, devido às ações do vento, e minimizar o impacto visual ocasionado pela disposição dos resíduos minerais.

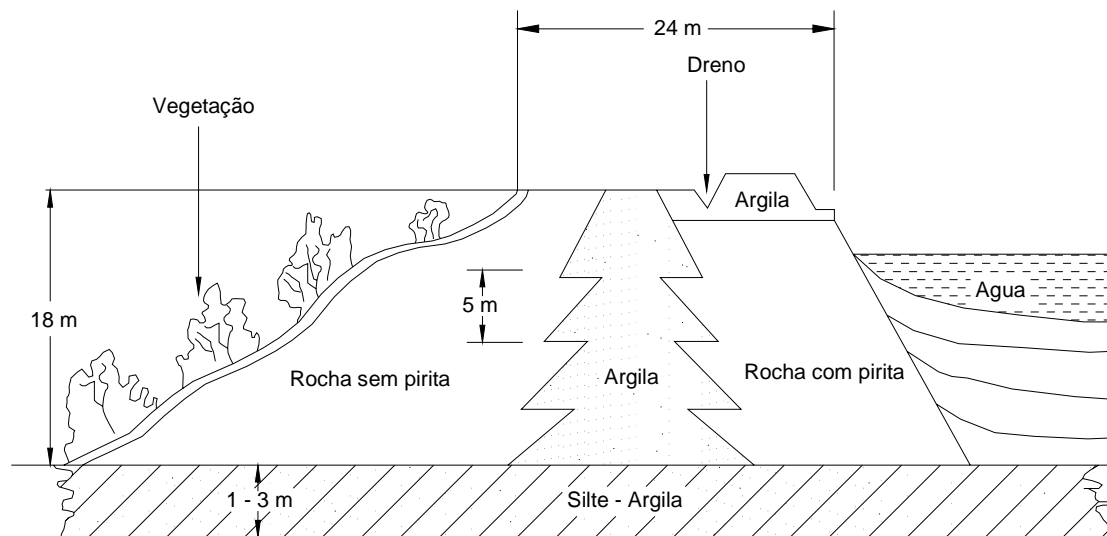


Figura 3.1 - Barragem de rejeito no norte de Wisconsin, EUA. (modificado - VICK, 1983)

Outra maneira de tratar os rejeitos de mineração é fazendo o uso positivo deles, como, por exemplo, realizar o reprocessamento do material, a fim de recuperar uma parte economicamente de interesse, ou então, usá-los como um produto útil em sua própria estrutura, por exemplo, o uso das partículas grossas como lastro de estradas de ferro e agregado. É prática comum nas minas subterrâneas, em que o método de funcionamento requer o enchimento de áreas a céu aberto, apreender no subsolo a fração mais grossa dos resíduos resultantes da mineração. Este método foi usado desde o começo do século XVII, em minas de ouro na África do Sul.

### 3.2. ATERROS HIDRÁULICOS

Os aterros hidráulicos se caracterizam como obras de terra, onde, no processo de construção o material é transportado e distribuído por via úmida. Um dos primeiros países a adotar este método construtivo, utilizando a técnica de dragagem, foi à Holanda, por volta do século XVII. Segundo RIBEIRO (2000), outros países fizeram uso dessa técnica, no Egito em 1856 foi realizada a construção do canal de Suez e no Canadá foi também utilizada a técnica de dragagem para remoção de cerca de 120 milhões de m<sup>3</sup> do solo de cobertura da mina de ferro Step Rock entre 1955 e 1960. Um outro dado histórico a ser mencionado, foi à construção de mais de cem

estruturas relacionadas a projetos hidroelétricos na antiga União Soviética, entre os anos de 1947 e 1973.

Os aterros hidráulicos foram considerados por muito tempo como uma técnica bastante aplicada pelos americanos, cujo início de aplicação reporta-se ao período de exploração do ouro na Califórnia (HSU, 1988). O uso dessa tecnologia permitiu a escavação e o transporte, utilizando a água, de areias a pedregulhos, de uma forma mais econômica, quando comparada a outras tecnologias existentes. Baseado nessas informações, até o ano de 1930 essa técnica foi adotada como solução padrão para a construção de grandes aterros. Como exemplo, pode-se destacar as barragens construídas na América do Norte com cerca de 80 m de altura e envolvendo cerca de 200 milhões de m<sup>3</sup>. Entretanto, a qualidade técnica destas estruturas era limitada e a tecnologia empregada baseava-se nas experiências e dificuldades encontradas em situações anteriores e/ou alguns conceitos propostos por SCHUYLER (1906). Com o reconhecimento da Mecânica dos Solos como ciência, em 1925, a técnica dos aterros hidráulicos ganhou nos conceitos relacionados a este segmento e passou-se a ter um controle mais seguro sobre essas obras de terra.

No início do século XX, a técnica de aterros hidráulicos foi utilizada na construção de algumas barragens no Brasil. Algumas dessas barragens encontram-se em operação até os dias de hoje. Fundamentada, principalmente, nos modelos americanos, a experiência brasileira envolveu a construção de cerca de dezesseis barragens por meio da técnica dos aterros hidráulicos, entre os anos de 1906 e 1945. Ressalta-se que essas barragens foram construídas com um baixo controle geotécnico e que os materiais utilizados na sua formação foram provenientes de jazidas localizadas nas proximidades da obra. Neste contexto, investigações geotécnicas posteriores foram realizadas e vários destes aterros foram reforçados nestes últimos anos, principalmente Guarapiranga e Rio Grande (MORETTI & CRUZ, 1996). A Tabela 3.1 apresenta um resumo das principais barragens brasileiras construídas pela técnica do aterro hidráulico, destacando-se pela importância e tamanho as barragens de Rio Grande e Guarapiranga.

O método de lançamento, característica fundamental dos aterros hidráulicos, representou uma dificuldade na execução das barragens brasileiras tanto na fase de construção quanto na



estabilidade global da estrutura definitiva. Nesse contexto, a falta de controle no lançamento do material foi a principal causa de restrições impostas ao método dos aterros hidráulicos. Além disso, às rupturas ocasionadas em algumas obras do mundo, contribuíram para que a prática dessa metodologia fosse abandonada na construção de barragens para fins hidroelétricos.

Tabela 3.1 - Aterros hidráulicos no Brasil construídos pela Light e Power Co.  
(modificado - RIBEIRO, 2000)

Nº	Nome	Altura Máx. (m)	Comp. da Crista (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	Rip-Rap (m <sup>3</sup> )	Largura da Crista (m)	Inclinação do Talude	
							Montante	Jusante
1	Rio Grande	30	1380	2500000	126500	10	1:5	1:2
2	Summit Control	22	250	213000	17000	2	1:4	1:1,75
3	Pequeno	13	160	105500	6400	13	1:2,5	1:2,5
4	Córrego Preto	7	470	116500	2500	8	1:3,5	1:3,5
5	Marcolino	19	400	403000	12300	10	1:3,5	1:2,5
6	Passareuva	10	470	391000	10200	10	1:3,5	1:2,5
7	Cubatão de Cima	12	300	200000	5000	10	1:3,5	1:2,5
8	Cascata	25	90	47700	1700	6 - 10	1:1,5-3,5	1:1,5-3
9	Cascata (Dique)	18	70	19300	1300	8	1:1,5-3	1:1,5-3
10	Dique n.º 1	3	220	10500	-	10	1:3	1:2
11	Dique n.º 2	5	400	41000	-	10	1:3,5	1:2
12	Dique n. 3	4	180	14500	-	10	1:3	1:2
13	Rio Pequeno	14	700	214200	-	17	1:2,25	1:2,25
14	Guarapiranga	14	1640	490000	19200	5 - 15	1:3	1:2
15	Cacaria n.º 1	23	73	84000	-	10	1:3,34	1:2,25
16	Cacaria n.º 2	23	124	171000	-	10	1:3,34	1:2,25

A técnica de aterro hidráulico, apesar de ser vista com grandes restrições perante alguns estudiosos, ainda tem sido muito utilizada, principalmente na construção de barragens de rejeitos, diques de contenção, recuperação de áreas submersas e ilhas superficiais. Baseados nesse contexto, muitos trabalhos têm sido realizados no intuito de melhorar a qualidade dos projetos e/ou métodos construtivos que estejam associados a essa técnica de construção.

Numa visão mais ampla, objetivando melhorar a qualidade da disposição de rejeitos de mineração, por meio da técnica de aterros hidráulicos, seria importante a criação de outros

procedimentos de controle, baseado, principalmente, em um monitoramento geotécnico ao longo do período de execução de uma determinada obra. De acordo com ESPÓSITO (2000), tais procedimentos estariam condicionados à avaliação das características do material empregado e ao acompanhamento da obra, fazendo-se o monitoramento através de instrumentação ou ensaios de avaliação das densidades no campo.

### **3.3. CONCEPÇÕES FÍSICAS NOS ATERROS HIDRÁULICOS**

As análises dos materiais depositados sob a forma de aterros hidráulicos revelam que a lama ao ser descartada, faz com que as partículas mais grossas e/ou mais pesadas tendam a se depositar formando as conhecidas praias de rejeitos. Por outro lado, a parcela representada pelas partículas finas tende a se concentrar na parte final do depósito, formando na maioria das vezes as lagoas de decantação.

É importante ressaltar, que mesmo tendo conhecimento sobre este mecanismo físico do processo de deposição hidráulica, as variações nos parâmetros de descarga podem gerar diversas alterações, de modo que as experiências e/ou os conceitos teóricos tornam-se insuficientes para avaliar o que realmente ocorre no processo de formação destes depósitos.

As diversidades na composição mineralógica do material, oscilações nas concentrações geradas no processo de beneficiamento, mudanças bruscas na vazão de descarga do rejeito e outros efeitos associados ao processo de lançamento, podem modificar de forma significativa as propriedades físicas e mecânicas dos aterros hidráulicos. Sendo assim, alterações geradas no processo de formação destes aterros podem gerar mudanças significativas no que diz respeito à estabilidade dos mesmos, haja vista uma série de variações nas características de deformabilidade, resistência e permeabilidade.

Considerando as dificuldades na previsão do comportamento destas estruturas tem se mostrado eficaz a utilização de combinações de conceitos das mais diversas ciências, associadas à mecânica dos solos, transporte de sedimentos, mecânica dos fluidos e hidráulica, dentre outros aspectos físicos. Além disso, tem-se demonstrado a aplicabilidade de estudos envolvendo ensaios de laboratório que busquem uma representatividade da situação de campo no sentido de obter

parâmetros que possam ser utilizados na fase de projeto e garantir a qualidade e segurança da estrutura a ser executada.

### **3.4. PARÂMETROS DOS ATERROS HIDRÁULICOS**

Como forma de avaliar de uma maneira mais segura a qualidade dos aterros hidráulicos aplicado a barragens de rejeitos, faz-se necessário ressaltar alguns parâmetros relevantes ao processo de deposição hidráulica, no sentido de indicar as variações que ocorrem ao longo da praia de deposição em função do regime de fluxo. Com base nesse contexto, são detalhados alguns dos parâmetros associados aos aterros hidráulicos, como: segregação granulométrica, densidade e geometria.

#### **3.4.1. Segregação Granulométrica**

A segregação é uma característica importante nos aterros hidráulicos e refere-se à tendência da fração sólida, ou parte dela escoar e/ou sedimentar. Após o lançamento ocorre uma seleção de grãos, em função do tamanho, da forma e da densidade das partículas. Assim, o fluxo de lama provoca a seleção de partículas que são depositadas em diferentes locais ao longo da trajetória do fluxo, gerando uma variabilidade estrutural de forma a alterar, significativamente, as características de resistência, deformabilidade e permeabilidade (RIBEIRO, 2000). Sendo assim, o conhecimento da segregação do material é fundamental para avaliar o comportamento do rejeito lançado, em termos de estabilidade na barragem.

Segundo MORETTI & CRUZ (1996) a segregação granulométrica é função do processo utilizado na execução de aterros hidráulicos, pois o rejeito ao escoar ao longo da praia de deposição, perde velocidade e conseqüentemente sua capacidade de arraste vai se limitando a partículas cada vez menores. Neste contexto, uma grande variabilidade granulométrica pode ser gerada em função das características do processo de deposição e do próprio rejeito gerando depósitos com diferentes propriedades geotécnicas associadas principalmente às diferenças no valor da densidade e da granulometria das partículas.

Além da segregação natural, ao longo da formação da praia, pode ocorrer também um processo

de segregação nas tubulações de descarga, provocadas pelas diferenças existentes no valor da densidade das partículas que compõe o rejeito. Logo, pode ocorrer descargas momentâneas de frações muito grossas ou muito finas durante a deposição, alterando o processo de segregação na praia devido a mudanças no próprio rejeito, na concentração e na vazão. Com isto, podem ser encontradas regiões próximas ao ponto de lançamento contendo material fino e outras mais distantes contendo material mais grosseiro, ou mesmo bandas de material mais fino devido às mudanças na posição dos canhões (RIBEIRO, 2000).

### **3.4.2. Densidade**

Um dos parâmetros mais relevantes a ser analisado nos projetos de aterros hidráulicos é a densidade do depósito formado. Obter uma densidade elevada significa promover melhores condições de estabilidade tanto sob condições estáticas, quanto dinâmicas. Estruturas fofas e saturadas são susceptíveis aos processos de liquefação. Logo, os parâmetros estabelecidos pela densidade constituem elementos fundamentais para estudar o comportamento dos aterros hidráulicos.

A densidade é uma medida indireta da estrutura dos solos, e conseqüentemente dos seus parâmetros geotécnicos, sendo importante ter uma metodologia adequada para projetar estes aterros de modo a maximizar o valor da densidade. Em estruturas de disposição de rejeitos, tais como barragens em aterro hidráulico e depósitos de material dragado, uma densidade elevada do material depositado representa um benefício adicional no aumento da sua vida útil.

No caso dos aterros compactados, quando ocorre o aumento na energia de compactação e o teor de umidade se aproxima da condição ótima, a densidade aumenta de valor. Sendo assim, esses parâmetros podem ser obtidos em laboratório por meio do ensaio de compactação e, com isso, pode-se prever antecipadamente a especificação técnica do método construtivo a ser adotado de forma segura.

Na prática, este fato não se reproduz necessariamente nos projetos de aterros hidráulicos devido à forma com que o material do aterro se comporta ao longo do processo de deposição, ou seja, o mesmo varia bastante ao longo da sua etapa de construção. Por outro lado, o solo constituinte da

formação do aterro também apresenta variações estruturais, devido às diferentes velocidades de fluxo, nas fases de lançamento e deposição. Todas essas características são de difíceis reproduções em laboratórios convencionais de geotecnia. Sendo assim, para que se tenha um maior entendimento destes mecanismos, tem-se adotado simulações de deposições hidráulicas em laboratórios procurando reproduzir o mecanismo de deposição que ocorre no campo.

### 3.4.3. Geometria

A geometria de um aterro hidráulico está relacionada ao arranjo físico do aterro formado após o término da deposição. A fração sólida durante o processo de deposição, após o descarte da lama, forma as conhecidas praias de aterros hidráulicos. As propriedades da praia, incluindo a geometria, são funções das características do material depositado e do método de descarga. Sendo assim, o arranjo físico observado na formação das praias de aterros hidráulicos é alterado em função dessas variáveis e do processo de segregação durante a deposição do material.

De uma forma geral, a geometria típica de uma praia de aterro hidráulico é definida por um perfil côncavo, onde ocorre uma inclinação mais acentuada próximo ao ponto de descarga do material e à medida que se aproxima do final da praia, tem-se uma inclinação mais suavizada. A Figura 3.2 ilustra a geometria típica de uma praia de aterro hidráulico.

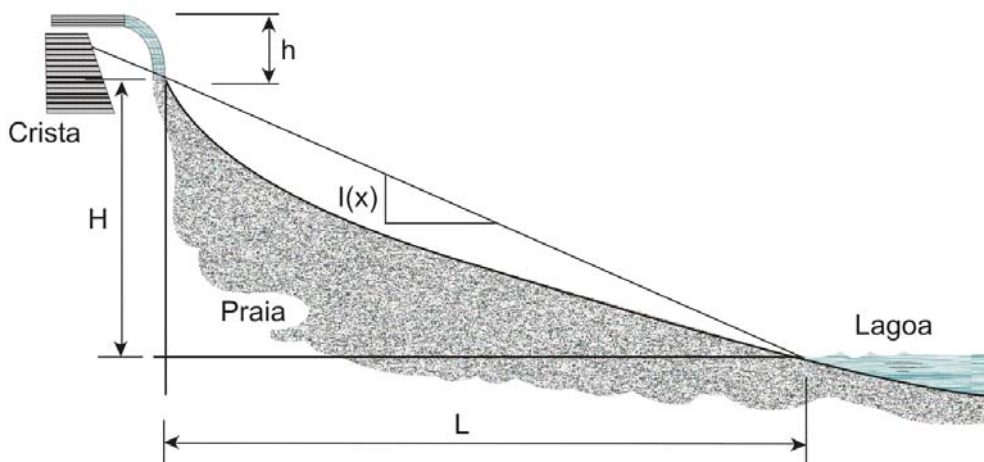


Figura 3.2 - Geometria típica de uma praia de aterro hidráulico. (modificado - RIBEIRO, 2000)

A obtenção da inclinação média da praia a ser formada constitui elemento essencial para a realização dos projetos de aterros hidráulicos. A inclinação média do talude permite a determinação do comprimento total da praia e, com isso, tem-se uma avaliação geral do tamanho e da área necessária para disposição da lagoa de decantação. Para as empresas de mineração que utilizam as barragens de rejeitos, segundo a técnica de aterros hidráulicos, como forma de dispor os resíduos provenientes do seu beneficiamento, a inclinação média permite a visualização da área a ser ocupada pelo aterro, de modo que se pode evitar problemas quanto aos aspectos relacionados a intervenções nos acessos às frentes de lavras e ao espaço destinado à usina de beneficiamento. Por outro lado, a geometria auxilia na determinação do volume de rejeitos a ser estocado, de forma a ter o período de vida útil da barragem e a capacidade de armazenamento projetada.

### **3.5. FORMAÇÃO DAS BARRAGENS DE REJEITO POR MEIO DA TÉCNICA DE ATERRO HIDRÁULICO**

Na formação das barragens de rejeito por meio de aterros hidráulicos, o material é lançado hidráulicamente e o transporte é feito por meio de tubulações, seja por bombeamento ou gravidade, sendo o último mais atrativo devido ao seu baixo custo. De uma maneira geral, o lançamento é realizado com a utilização de hidrociclones ou canhões. Os hidrociclones promovem a classificação granulométrica, podendo ocorrer tanto na planta quanto próximo do ponto de lançamento na barragem. Na planta, a ciclonação tem a função de retirar a água da polpa do rejeito, de forma que a mesma possa vir a ser reutilizada nos processos de beneficiamento. Quando instalados próximos à barragem, os hidrociclones têm por objetivo separar o material em granulometrias diferentes, conhecidas por “underflow” e “overflow”. Convém ressaltar, que nos hidrociclones o rejeito é separado pela ação da força centrífuga, deste modo, as partículas mais grossas tendem a seguir o sentido de cima para baixo (“underflow”) e as partículas mais finas circulam no sentido de baixo para cima (“overflow”), conforme descrito detalhadamente no Capítulo 2 do presente trabalho.

O maior percentual de água existente na composição do rejeito fica incorporado ao “overflow”, material que apresenta granulometria fina e compõe a lama. O “underflow” é composto de material mais grosso ou rejeito granular que ainda se encontra saturado e apresenta melhores

características de resistência e permeabilidade se comparado ao “overflow”. Sendo assim, o rejeito granular é utilizado como material de construção da estrutura da barragem, enquanto a lama é lançada diretamente no reservatório. A grande vantagem da utilização deste procedimento de separação está no aumento da estabilidade da estrutura, pela manutenção do alto coeficiente de permeabilidade evitando elevações do nível d’água, ao garantir que o material fino não se incorpore ao aterro.

A separação do material promovida pelos hidrociclones só ocorre granulometricamente se todos os sólidos ciclizados apresentarem a mesma densidade. Se isso não ocorrer, a separação granulométrica não será eficiente, ficando condicionada às diferenças na densidade das partículas e não ao tamanho dos grãos. Assim, o “underflow” pode ser constituído por partículas mais finas, porém mais pesadas, enquanto o “overflow” pode apresentar partículas mais grossas, contudo mais leves.

Uma outra forma de disposição pode ser realizada por um sistema de canhões uniformemente espaçados que lançam os rejeitos ao longo da crista da barragem, sem a necessidade de relocar freqüentemente o canhão ou desconectar partes da tubulação. O lançamento também pode ser feito por um único canhão, entretanto, esta solução apresenta alguns inconvenientes em virtude da necessidade de deslocamentos ao longo da barragem. No caso da utilização de canhões, o processo de separação granulométrica ocorre na própria praia em função da vazão de descarga, concentração e características mineralógicas do rejeito. As Figuras 3.3 e 3.4 mostram a forma de deposição hidráulica do rejeito na praia, utilizando-se canhões como elemento de lançamento por ponto único e em linha, respectivamente.

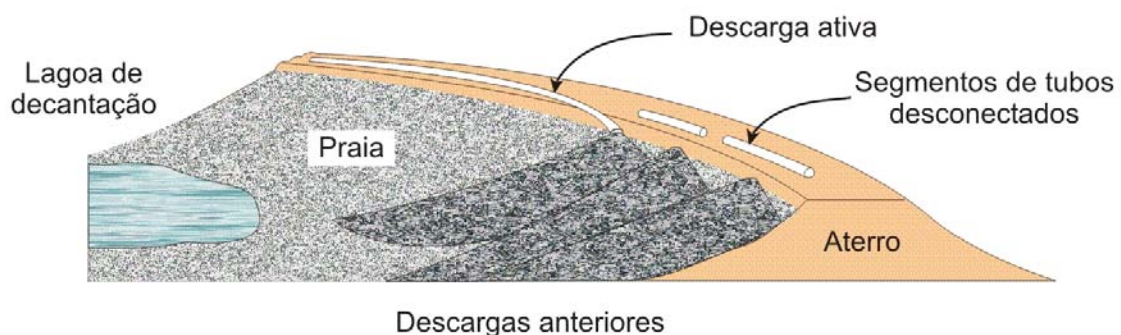


Figura 3.3 - Métodos de descarga por ponto único - (modificado - RIBEIRO, 2000)

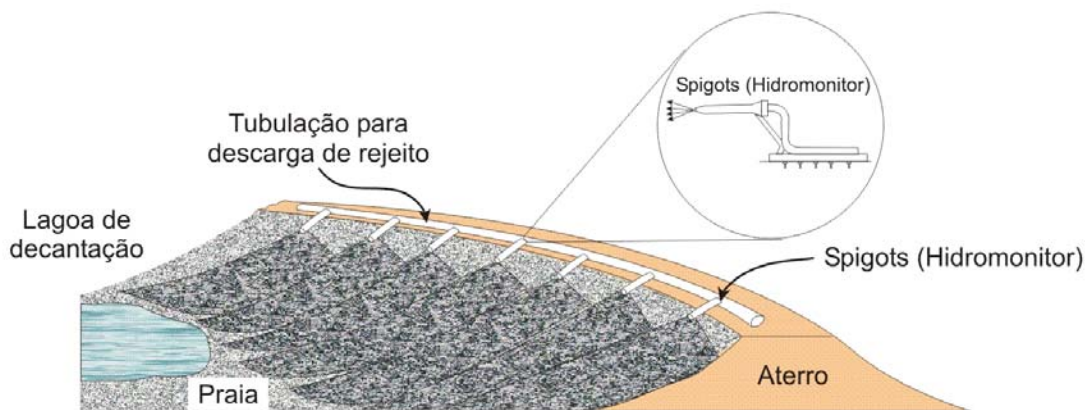


Figura 3.4 - Métodos de descarga em linha - (modificado - RIBEIRO, 2000)

### 3.6. MÉTODOS CONSTRUTIVOS DAS BARRAGENS DE REJEITOS

As barragens de rejeitos, de uma forma geral, são formadas por duas etapas: a primeira etapa consiste na construção de um dique de partida composto de solo ou enrocamento compactado. A segunda etapa corresponde à construção contínua e conjunta com a operação da mina, através de alteamentos sucessivos executados com solos compactados ou com a fração grossa do rejeito arenoso, desde que a quantidade de rejeito arenoso gerado ao longo do beneficiamento, seja suficiente para a construção da barragem. Estes alteamentos devem ocorrer nas mesmas proporções do reservatório para evitar que o lago se aproxime da barragem e venha a causar a elevação da linha freática e a possível perda de estabilidade.

As barragens alteadas com o próprio rejeito tornam-se vantajosas devido ao baixo custo quando comparadas às barragens convencionais, que são construídas em uma única etapa usando materiais de empréstimos e com elevado custo. Além disso, dependendo da necessidade de disposição dos resíduos minerais, por parte das empresas de mineração, as barragens de rejeitos podem ser alteadas em etapas. Neste caso, os custos com a construção da barragem são diluídos ao longo da vida útil da barragem, não apresentando um custo inicial muito alto, e permitindo, no decorrer da execução, estabelecer uma sistemática de revisões periódicas do projeto, em função das variações das características do rejeito.



LOPES (2000), considerando o barramento para disposição de rejeitos, salienta a diferença entre barragem de rejeito e pilha de rejeito. As barragens de rejeitos são aquelas construídas com a finalidade de reter líquidos e a lama de rejeitos dos minérios. Já as pilhas de rejeitos são estruturas que não possuem a finalidade de retenção de líquidos, mas constituem-se de um barramento para o suporte de rejeitos e, por essa razão, em alguns casos também são chamadas de barragens de rejeitos.

De uma maneira geral, o alteamento das barragens pode assumir muitas configurações, cada uma com suas próprias características, requisitos, vantagens e riscos. Considerando o rejeito como o material usado nos alteamentos das barragens, podem ser considerados três métodos construtivos:

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

### **3.6.1. Método de Montante**

O método de montante é o mais antigo e econômico método de construção de barragens, sendo uma evolução natural do procedimento empírico de disposição de rejeitos. Realiza-se inicialmente a construção de um dique de partida, normalmente construído de solo ou enrocamento compactado. Após a construção do dique, o rejeito é lançado por canhões em direção a montante da linha de simetria do dique, formando assim a praia de deposição, que se tornará a fundação e eventualmente material de construção para o próximo alteamento. Este processo continua sucessivamente até atingir a altura final prevista em projeto.

As principais vantagens do método de montante são o baixo custo de construção e a velocidade com que a barragem pode ser alteada. KLOHN (1981) afirma que com o uso de ciclones a velocidade de construção se eleva bastante. CHAMMAS (1989) recomenda a implantação de praia de lamas (finos) entre o talude de montante da barragem e o nível do reservatório como requisito adicional de segurança operacional das barragens de rejeitos. Este procedimento tende a reduzir a percolação e os riscos de “piping”, pelo abatimento da linha frática.

Segundo VICK (1983), outra vantagem do método de montante são os pequenos volumes de aterros compactados necessários para construção dos alteamentos sucessivos. Estes alteamentos são de fácil execução e podem ser introduzidos na rotina da mineradora, utilizando um mínimo de equipamentos e pessoal.

Embora sendo o mais utilizado pela maioria das mineradoras, o método de montante apresenta um baixo controle construtivo, tornando-se crítico principalmente em relação à segurança. A principal desvantagem do método é o alteamento realizado sobre rejeitos previamente depositados e não consolidados. Estes rejeitos têm limitada resistência ao cisalhamento, por apresentarem-se fofos e saturados. Sobre uma condição de carregamento estático, deve ser considerada uma limitação da altura da barragem evitando a ocorrência de ruptura por cisalhamento na direção de montante (VICK, 1983). Além disso, existem poucas medidas que podem ser tomadas para controlar o nível d'água interno da barragem, dificultando a prevenção contra possíveis problemas de estabilidade e de "piping" que possam vir a surgir com o aumento do nível d'água dentro da barragem. A Figura 3.5 ilustra o método de montante.

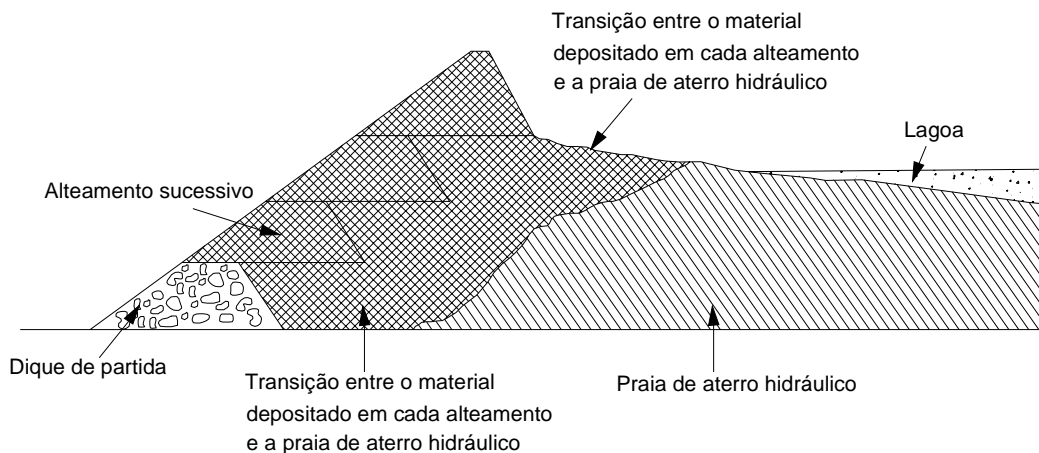


Figura 3.5 - Ilustração representativa do método de montante utilizado na construção de barragens de rejeito - (modificado - VICK, 1983)

Sobre a ação de carregamentos dinâmicos este tipo de barragem pode estar sujeita a ruptura por liquefação. A baixa densidade relativa e geralmente a saturação com que os rejeitos são depositados podem resultar em liquefação induzida pelo fluxo no rejeito e/ou por grandes

recalques devidos a carregamentos estáticos, com desastrosas conseqüências. GUMIERE et al. (1995) afirmam que os alteamentos provocam carregamentos adicionais ao rejeito já lançado no reservatório, podendo levá-lo a consideráveis adensamentos e a possíveis rupturas pelo fenômeno da liquefação. Tais rupturas podem ser favorecidas quando as barragens de rejeitos são executadas sem um sistema de drenagem adequado, tal como o método de montante, evidenciando-se o desenvolvimento de elevadas poro-pressões no corpo da barragem e nos próprios rejeitos. Assim, este método é desaconselhável para áreas com grande potencial sísmico.

### 3.6.2. Método de Jusante

No método de jusante, o dique de partida é construído e a barragem é alteada em direção a jusante e conseqüentemente o alteamento não ocorre sobre o rejeito previamente depositado. Este método exige maiores volumes de materiais de construção controlados, podendo ser utilizado o próprio rejeito, solos de empréstimos ou estéril proveniente da cobertura da lavra. Na utilização do próprio rejeito deverão ser utilizados ciclones ou outro método de separação, para garantir que somente a fração grossa seja utilizada no corpo da barragem. A Figura 3.6 ilustra o método de jusante.

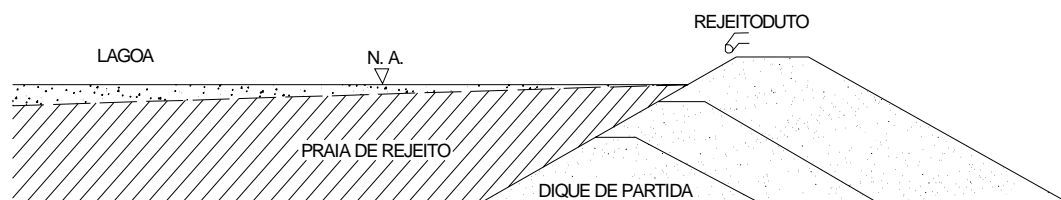


Figura 3.6 - Ilustração representativa do método de jusante utilizado na construção de barragens de rejeito - (modificado - KLOHN, 1981)

Segundo KLOHN (1981), as maiores vantagens do método de jusante são:

- nenhuma parte da barragem é construída sobre o rejeito previamente depositado;
- o controle do lançamento e da compactação pode ser executado seguindo as especificações técnicas convencionais de construção;

- os sistemas de drenagens internos podem ser instalados durante a construção da barragem, de forma a permitir o controle da linha de saturação e, com isso, garantir a estabilidade do maciço formado;
- a barragem pode ser projetada e subsequentemente construída para ter a resistência necessária ou requerida, inclusive resistir a forças sísmicas;
- escalonamento da construção sem interferência na segurança;
- possibilidade de seguimento integral das especificações de projeto.

A maior desvantagem do método é o grande volume do maciço controlado ou compactado, o que gera um alto custo de construção. Segundo KLOHN (1981), um problema que pode ocorrer é a insuficiência de material grosso (“underflow”) para manter a crista da barragem de rejeitos acima do nível do reservatório. Neste caso, é necessário à construção de um alto dique de partida ou utilizar materiais de empréstimos, o que acaba por produzir um aumento considerável nos custos de execução.

### 3.6.3. Método da Linha de Centro

O método da linha de centro é uma variação do método de jusante e a diferença é que a crista da barragem não se desloca para jusante, mas sim verticalmente de forma que o espaldar de montante apóia-se sobre os rejeitos e o de jusante sobre toda a etapa subsequente. A maior vantagem deste método em relação ao de jusante é a necessidade de um menor volume de material para construção do corpo da barragem. A Figura 3.7 ilustra o método da linha de centro.

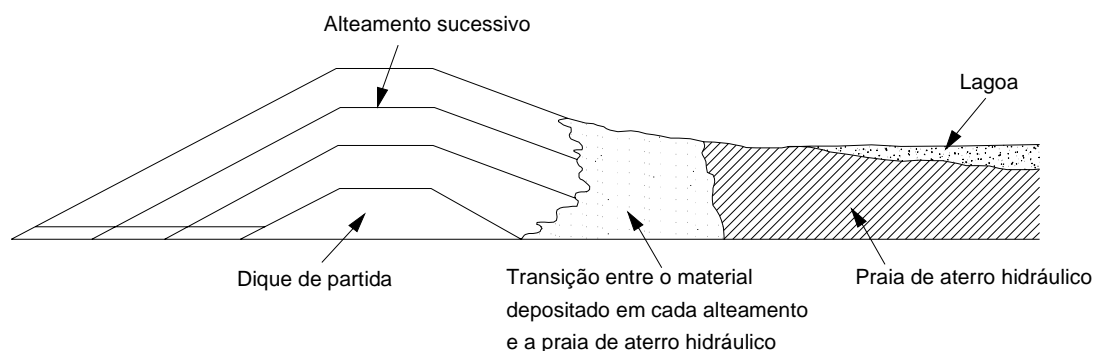


Figura 3.7 - Ilustração representativa do método da linha de centro utilizado na construção de barragens de rejeito - (modificado - KLOHN, 1981)

O método da linha de centro é uma solução geometricamente intermediária entre os métodos de montante e jusante, embora seu comportamento estrutural se aproxime mais do método de jusante, permitindo a utilização de drenos internos e assim ter o controle da linha de saturação.

A escolha de um ou outro método de execução irá depender de uma série de fatores relacionados ao tipo, características geotécnicas e nível de produção de rejeitos, necessidade de reservar água, necessidade de controle de água percolada, sismicidade, topografia, hidrologia, hidrogeologia e geologia local e custos envolvidos. Em vista da maior utilização de rejeitos ciclados e da possibilidade de um melhor controle geotécnico, o método da linha de centro tem sido utilizado atualmente alternativamente ao método de montante.

### MATERIAIS E MÉTODOS

#### 4.1. INTRODUÇÃO

No intuito de promover uma caracterização representativa da adequabilidade do rejeito de ouro na formação dos aterros hidráulicos, realizou-se uma série de simulações no ESDH com diferentes valores de concentração e a vazão da polpa. Estas simulações tiveram como objetivo avaliar o comportamento deste rejeito em função das alterações nas variáveis de deposição hidráulica. Assim, para cada simulação realizada, foram coletadas amostras, ao longo da praia formada, para obtenção das características de densidade, permeabilidade, geometria do depósito e segregação hidráulica.

Neste sentido, apresenta-se a seguir a metodologia adotada no desenvolvimento desta pesquisa, bem como é feita uma descrição sucinta das características da Mina do Morro do Ouro e do Equipamento de Simulação de Deposição Hidráulica (ESDH).

#### 4.2. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO (ESDH)

Desenvolvido por RIBEIRO (2000), o ESDH visa estudar os mecanismos de deposição hidráulica em simulações de laboratório e avaliar o comportamento geotécnico destes depósitos com relação as variáveis que afetam o processo de deposição hidráulica como a vazão e a concentração da lama. O ensaio permite obter amostras representativas do material depositado favorecendo a obtenção de parâmetros geotécnicos mais próximos dos que ocorrem no campo.

O ESDH é composto basicamente de três partes fundamentais que funcionam de modo integrado durante a realização dos ensaios, permitindo a manutenção dos parâmetros de fluxo e as condições para um processo controlado de deposição hidráulica. A parte principal do equipamento consiste de um canal de deposição, onde ocorre à formação das praias obtidas a partir das simulações realizadas no ESDH. Integrado a esse canal encontra-se um sistema de alimentação acoplado a um sistema de controle de descarga. A Figura 4.1 mostra um esquema do ESDH, sendo apresentado a seguir os detalhes de cada uma das partes que compõe o mesmo.

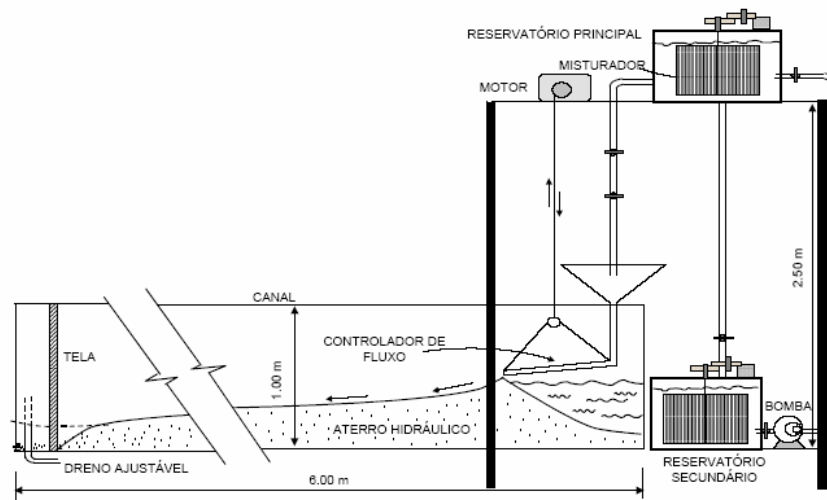


Figura 4.1 - Ilustração representativa do Equipamento de Simulação de Deposição Hidráulica - ESDH - (RIBEIRO, 2000).

#### 4.2.1. Canal de Deposição Hidráulica

O canal de deposição hidráulica consiste da parte principal do ESDH tendo 6,00 m de comprimento, 0,40 m de largura e 1,00 m de altura. O mesmo foi projetado utilizando-se perfis metálicos que servem como elementos portantes das paredes laterais em vidros temperados, de 1,00 m<sup>2</sup> e 10 mm de espessura. Convém ressaltar, conforme mencionado por RIBEIRO (2000), que a estrutura do canal foi dimensionada para suportar o empuxo provocado pelo material a ser depositado. As paredes em vidro foram adotadas face à necessidade de visualização das simulações das deposições hidráulicas ao longo do canal. Visando minimizar possíveis irregularidades no contato perfil metálico versus paredes de vidro, teve-se o devido cuidado em não deixar saliências para que não houvesse alterações significativas no regime de fluxo interno ao canal.

Para suportar o peso do canal foi projetada uma viga de sustentação situada na parte inferior do canal. Esta viga permite mudanças da inclinação do canal por meio de um macaco hidráulico acoplado ao equipamento. O fundo do canal é composto por uma chapa metálica com 5 mm de espessura visando absorver os esforços provocados pelo peso próprio do material a ser depositado evitando o deslocamento vertical da base no momento das simulações de deposição

hidráulica. No intuito de promover uniformidade no processo de drenagem ao longo dos depósitos, foi utilizada uma manta de geotêxtil não tecido de gramatura  $600 \text{ g/m}^2$ , fixada a base.

#### **4.2.2. Sistema de Alimentação**

O sistema de alimentação é formado por três reservatórios, sendo um principal, localizado na parte superior do canal, e dois secundários, localizado ao lado do equipamento onde é feita a preparação da mistura. Todos esses reservatórios são interligados por meio de tubulações em PVC, onde o material ensaiado é transportado por meio de uma bomba especial para sólidos. Para não ocorrer o transbordamento do material a ser ensaiado no reservatório superior, o nível da mistura é mantido constante através de extravasores de saída, localizados em pontos pré-definidos na lateral do reservatório.

A adoção deste sistema de alimentação permite que o uso dos reservatórios em conjunto, promova uma continuidade no abastecimento do material ao longo das simulações, permitindo a realização dos ensaios sem nenhuma interrupção. Além disso, uma outra forma de justificar a concepção adotada deve-se ao fato da localização do reservatório superior, que funciona como um elemento de difícil acesso para a alimentação da mistura de forma direta.

Como forma de garantir a homogeneidade do rejeito ensaiado e com isso preservar a qualidade das simulações, foram instalados misturadores internos tanto no reservatório superior, quanto nos reservatórios secundários. Os misturadores contidos em cada reservatório são constituídos por um conjunto de pás metálicas vazadas e que percorrem toda a seção dos reservatórios. De acordo com RIBEIRO (2000), a velocidade de rotação adotada foi da ordem de 60 rpm, tendo sido calculada em função da concentração da lama e da seção dos reservatórios, de forma a garantir a homogeneidade do material e a concentração constante. Na parte inferior do eixo central das pás, existe uma haste em forma de hélice de modo a manter os sedimentos acumulados no fundo dos reservatórios em suspensão. O trabalho desenvolvido por esta haste visa minimizar a deposição do rejeito ensaiado no interior do reservatório, fazendo com que a qualidade do ensaio seja preservada e sem tenha uma amostra de concentração constante durante todo o ensaio.



### **4.2.3. Sistema de Descarga**

A disposição do material ensaiado (lama) dentro do canal é feita através de um controlador de fluxo projetado para produzir um regime uniforme ao longo de todo o canal, pelo direcionamento do fluxo paralelo às paredes do canal. De acordo com RIBEIRO (2000), esse projeto foi baseado numa proposta inicial apresentada por KUPPER (1991). A extremidade final do controlador apresenta um sistema de ajuste que permite aumentar ou diminuir a abertura de saída do fluxo, permitindo a variação da velocidade de descarga que entra no canal.

Para que haja um ajuste entre a vazão adotada em cada ensaio e a distribuição da lama ao longo do canal, foi instalado um sistema de elevação acoplado ao controlador de fluxo, possibilitando sua ascensão em função da velocidade de subida da crista do aterro. Este sistema garante uma altura constante entre a superfície de deposição e a base do controlador de fluxo. Para que o movimento de subida ou descida do controlador de fluxo obedeça à altura de elevação da crista formada, existe instalado na estrutura do ESDH um pequeno motor que promove o tracionamento dos cabos, de modo a se garantir um equilíbrio sempre constante entre o nível do controlador e a elevação da crista.

### **4.2.4. Sistema de Drenagem**

No final do canal de deposição hidráulica foi instalado um sistema de drenagem de forma a manter o nível d'água constante durante o processo de formação das praias. Segundo RIBEIRO (2000), o cálculo do sistema de drenagem foi baseado na estimativa de depósitos com inclinação média de 10% e comprimento máximo de 3,00 m, obtido a partir de um depósito piloto realizado com cota da drenagem do canal coincidindo com a cota do fundo do canal.

O sistema de drenagem visa manter o nível da lagoa de decantação e evitar que o processo de deposição ocorra debaixo d'água, pela concentração excessiva de água no canal. Como justificativa para a preservação da lagoa, no interior do canal, destaca-se que a sua presença diz respeito a um aspecto muito importante na reprodução das características de deposição que ocorrem no campo.

A tela instalada ao término do canal serve como uma barreira para contenção de partículas, antes do sistema de drenos, e também tem o objetivo de evitar perda de material fino pela descarga na saída do canal. Por intermédio desse barramento foi possível a contenção do material mais fino e mantiveram-se praticamente todas as partículas na lagoa de decantação.

#### 4.2.5. Composição Geral

Todos os sistemas apresentados anteriormente funcionam de forma integrada e compõe o arranjo geral do ESDH. Uma conexão direta é estabelecida entre eles desde a fase inicial, no momento da preparação da mistura, até a descarga final no canal. A eficiência de todos esses sistemas foi avaliada passo a passo durante o trabalho desenvolvido por RIBEIRO (2000). A Figura 4.2 mostra uma visão geral do Equipamento de Simulação de Deposição Hidráulica (ESDH).



Figura 4.2 - Visão geral do ESDH (RIBEIRO, 2000).

#### 4.3. SIMULAÇÃO NO ESDH

Inicialmente, coloca-se uma camada média de 10 cm do rejeito de ouro sobre a manta de geotêxtil não tecido, com o objetivo de promover uma maior uniformidade no processo de drenagem para os depósitos a se formarem. Para a colocação dessa camada de fundo faz-se à distribuição manual do rejeito sob a manta, e em seguida promove o nivelamento da camada. Esse nivelamento também é feito de forma manual, utilizando como referência a cota de saída, na extremidade inicial do controlador de fluxo, seguida por medidas intermediárias a cada 1 m, até o

término do mesmo. Este procedimento é adotado para todas as simulações. Após a finalização de cada ensaio, é removido todo o material depositado ao longo do canal e feito um jateamento de água sobre a camada de geotêxtil. Assim, para o início de um novo ensaio, coloca-se uma nova camada de rejeito com espessura média de 10cm e repete todo o procedimento mencionado.

Dando continuidade ao processo de simulação no ESDH, calcula-se a quantidade de rejeito a ser utilizado e o volume de água necessário em cada uma das simulações, com base nos valores das concentrações pré-definidas para cada simulação. Para efeito do valor da concentração utilizou-se uma relação entre pesos. Sendo assim, a concentração adotada para o programa experimental deste trabalho foi obtida a partir da relação entre os pesos de água e sólidos, conforme a equação a seguir:

$$C = \frac{W_s}{W_t} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

Onde: C - concentração da mistura;

$W_s$  - peso de sedimentos;

$W_t$  - peso total

Tomando-se por base a Equação 4.1, o material foi preparado para uma concentração pré-definida, no programa experimental mencionado adiante. Após fazer o cálculo do peso de sólidos em cada ensaio, acondicionou-se os materiais sólidos em sacos de 15 kg. Convém ressaltar que foi realizado correções de umidade no material utilizado.

Após essa etapa de pesagem, os sólidos foram lançados diretamente no reservatório secundário para preparar a lama (composição de rejeito mais água). Acondicionado o material sólido no interior do reservatório secundário, a água era adicionada ao mesmo por meio de um outro reservatório, situado em um nível mais acima. Como forma de controlar o volume de água a ser utilizado em cada ensaio, foram feitas graduações nas laterais do reservatório secundário, correspondendo à quantidade de água necessária para cada simulação. Tendo em vista facilitar o procedimento da preparação da mistura, adotou-se para todos os ensaios a mesma quantidade de água, variando apenas, o peso de sólidos para cada concentração especificada. Com o material

sólido e a água dentro do reservatório secundário, ligou-se o misturador interno dando início ao processo de homogeneização do material. Assim, tão logo o material encontrava-se homogêneo, a lama era bombeada até o reservatório principal situado na parte superior do ESDH.

O transporte da lama foi feito pelo acionamento da bomba de sucção e da abertura das válvulas que liberavam o fluxo do material até o reservatório principal. Para que não houvesse transbordamento da lama no reservatório principal utilizou-se válvulas que funcionavam como extravasores e permitiam a recirculação da lama. Para preservar a homogeneidade do material ensaiado, o reservatório principal utilizava um misturador interno funcionando concomitante com o misturador existente no reservatório secundário. Após inicializado o processo de bombeamento e recirculação da lama, eram feitas medições de vazão no ponto de descarga, no intuito de estabilizá-la, conforme pré-definido no início de cada ensaio. As medições se davam por meio de um cronômetro e um becker de capacidade igual a 2 litros, dessa forma, se a vazão estivesse superior a especificada no ensaio, estrangulava-se o adaptador existente na saída do reservatório principal. Por outro lado, caso a vazão tivesse inferior a especificada para o ensaio, promovia-se à abertura do adaptador. Após a estabilização da vazão, dava-se início a disposição da lama ao longo do canal. Convém ressaltar, que durante a realização do ensaio eram feitas avaliações periódicas da vazão no ponto de descarga, para preservar as características de cada simulação. Foi feito também o monitoramento para avaliar a concentração da mistura e a eficiência do sistema instalado. Esse monitoramento tornou-se possível com a coleta de 12 amostras, aproximadamente, em cada ensaio. Para obtenção dessas amostras, no ponto de lançamento do controlador de fluxo, fazia-se o enchimento de garrafas descartáveis de 500 ml e posteriormente verificava-se a equivalência da concentração ensaiada.

Diante do ajuste da vazão de descarga, a lama era distribuída no canal por meio do controlador de fluxo. Em determinados momentos se fazia necessário o ajuste da velocidade de ascensão do controlador de fluxo, face à relação adotada para cada ensaio de vazão e concentração, bem como a evolução do aterro formado. Estes ajustes eram feitos visando assegurar a altura de deposição constante entre a superfície do aterro e a base do controlador de fluxo.

Durante a realização do ensaio o ajuste da altura do controlador de fluxo era feito visualmente, sempre que necessário, de modo a garantir uma variação mais próxima da velocidade de evolução do aterro. O ajuste era feito por meio de um dispositivo acoplado a um motor, na qual era permitido elevar o controlador de fluxo e/ou baixá-lo, de forma que o mesmo ficasse no mesmo nível da superfície do aterro formado. Para garantir a horizontalidade do controlador de fluxo instalou-se um nível de bolha, no intuito de monitorar uma descarga uniforme do material, de modo a evitar elevadas concentrações em um dos lados do canal.

Dependendo da velocidade de descarga ocorriam pequenos processos erosivos no interior do canal que podiam variar desde o final da praia formada até o início da crista. Como forma de minimizar esses fenômenos, foram feitos alguns ajustes na altura do controlador de fluxo, de modo a promover a correção desses processos erosivos. Por outro lado, em alguns dos ensaios, essas variações eram muito pequenas e na maioria dos casos o próprio processo de deposição hidráulica promovia os ajustes ao longo da praia formada, tornando-se desnecessário a realização de ajustes junto ao controlador de fluxo.

Para cada simulação realizada utilizaram-se duas seqüências de misturas do material estudado. Este procedimento foi adotado visto que uma única bateria (apenas um reservatório com a lama) gerava ao longo da praia uma quantidade insuficiente de material para ser analisado. Logo, ao longo do ensaio o reservatório secundário era alimentado com um novo reabastecimento de materiais sólidos e água, ressaltando-se que a transição foi realizada com cuidado para preservar as características de vazão e concentração durante a realização do mesmo. Observou-se que mesmo diante dessa transição as medições de vazão e a concentração da lama permaneceram próximas quando comparadas ao material coletado na primeira bateria.

É importante ressaltar que durante todo o ensaio foram realizadas avaliações sistemáticas da vazão e da concentração, com o objetivo de identificar possíveis anomalias quer no processo de bombeamento, quer no desempenho dos misturadores internos dos reservatórios. Assim, de uma forma geral observou-se pequenas variações nesses parâmetros, devido às limitações inerentes ao equipamento, como elevadas concentrações, baixas vazões, diâmetro da tubulação, dentre outros. Contudo, em função das baixas variações encontradas nos valores medidos durante a realização

dos ensaios, foi possível adotar a média desses valores como parâmetro nominal para cada um dos ensaios.

O sistema de drenagem ao término do canal foi ajustado em função da evolução do depósito (aterro) formado e da vazão de descarga especificada para cada ensaio. Esse ajuste estava condicionado à manutenção da lagoa de decantação formada na parte final do canal. Conforme descrições mencionadas por RIBEIRO (2000), os drenos foram dimensionados para manter uma distância de 2,5 m da extremidade final do canal até o término da praia. Entretanto, em função de algumas vazões elevadas observou-se à formação de lagoas com comprimentos superiores a 2,5 m, devido à formação de praias com comprimentos variando de 2,4 a 3,0 m. Por outro lado, apenas uma pequena parte do aterro manteve-se submersa, de forma que a evolução do aterro ocorreu acima do nível d'água, preservando as características do campo.

Com a utilização de toda a lama acondicionada dentro do reservatório principal, a simulação era paralisada e iniciavam-se as medições pertinentes à configuração da praia formada. Essas medidas foram feitas a cada 10 cm, tomando-se como base 3 leituras em cada alinhamento, uma no centro do canal e duas nas laterais (direita e esquerda). Utilizou-se para obtenção das leituras uma trena, onde o nível de referência adotado foi à face superior do ESDH. Com base nas leituras feitas ao longo da praia foi possível a realização de estudos sobre a configuração do depósito formado e a determinação da inclinação média do perfil obtido.

Terminada as medições das leituras o próximo passo foi avaliar o comportamento do depósito quanto à permeabilidade, densidade, teor de umidade, distribuição granulométrica e massa específica das partículas sólidas. Para estas análises foram coletadas amostras deformadas e indeformadas em diferentes pontos do depósito, após um período de 24 h ao término das simulações. Como forma de facilitar a coleta das amostras, ao longo da praia, utilizou-se uma plataforma fixada à estrutura do canal do ESDH, de modo que foi possível o acesso ao fundo do canal, sem que houvesse um contato direto com a praia e evitando causar uma perturbação ao longo de todo o depósito.

Para as descrições referentes aos ensaios de permeabilidade, densidade, granulometria, massa específica dos grãos e avaliação do perfil das praias formadas no ESDH, apresenta-se, mais

adiante, todos os detalhes e procedimentos adotados ao longo deste trabalho.

Finalizada a etapa de coleta das amostras, a simulação no ESDH era encerrada e parte do material existente no canal era removido. Entretanto, convém ressaltar que no processo de remoção do material, deixava-se uma camada nivelada de aproximadamente 10 cm de espessura, para receber o material proveniente de um novo ensaio. Este tipo de procedimento visava preservar as características de drenagem semelhantes em todos os ensaios e proporcionar comparações entre um ensaio e outro. Além disso, o aumento da camada drenante (superior a 10 cm) poderia ocasionar alterações no valor da densidade do material quando comparado com outras simulações.

#### 4.4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para efeito desta pesquisa foi proposto um programa experimental capaz de reproduzir um banco de dados satisfatórios para a caracterização e análise do comportamento do rejeito de ouro em estudo. O quantitativo dos ensaios realizados e as variações nos parâmetros de concentração e vazão, estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Resumo dos ensaios realizados no ESDH.

Ensaio	Nominal		Real	
	Concentração (%)	Vazão (l/min)	Concentração (%)	Vazão (l/min)
C10Q10	10	10	11,0	10,2
C10Q15	10	15	10,5	14,9
C15Q10	15	10	18,7	9,8
C15Q15	15	15	16,9	16,2
C25Q15	25	15	27,4	15,6
C25Q20	25	20	25,9	21,3
C30Q20	30	20	28,2	22,1
C30Q30	30	30	29,1	32,4
C35Q20	35	20	38,6	21,2
C35Q30	35	30	34,4	30,8

Para os ensaios mencionados acima, em função do desenvolvimento concomitante desta dissertação de mestrado com a tese de doutorado de HERNANDEZ (2007), no segmento voltado para deposições hidráulicas no mesmo rejeito de ouro, foi utilizado parte dos dados obtidos por HERNANDEZ (2007). Assim, tendo em vista que o trabalho de doutorado contemplou

simulações com vazões e concentrações baixas, foram selecionados os dados obtidos nos ensaios C10Q10, C10Q15, C15Q10, C15Q15, C25Q15 e C25Q20. Os ensaios C30Q20, C30Q30, C35Q20 e C35Q30 foram desenvolvidos durante esta pesquisa.

É importante ressaltar e conforme mencionado anteriormente que após o processo de deposição hidráulica, foram realizados os ensaios destinados à caracterização do depósito como granulometria, densidade e permeabilidade em função do ponto de lançamento. Assim, foram feitas análises ao longo de todo o depósito formado no canal, em pontos pré-definidos, conforme descrições mais adiante.

## **4.5. CARACTERÍSTICAS DO MINÉRIO DA MINA DO MORRO DO OURO**

### **4.5.1. Localização**

A Mina do Morro do Ouro localiza-se imediatamente ao norte do perímetro urbano da cidade de Paracatu, município e comarca de Paracatu, extremo noroeste do Estado de Minas Gerais. Tem como coordenadas de identificação 17° 13' 01" de latitude sul e 46° 52' 17" de longitude oeste. A cidade de Paracatu situa-se às margens da rodovia BR-040. Brasília - Rio, distando cerca de 230 km de Brasília e 500 km de Belo Horizonte.

### **4.5.2. Geologia**

A região onde está localizada o depósito do Morro do Ouro está inserida na Plataforma Sul-Americana, Província do Tocantins (ALMEIDA & HASUI, 1984), mais especificamente, situada na porção centro-leste da zona externa da faixa de cavalgamentos e dobramentos Brasília (ALMEIDA, 1967; DARLENE, 1978; MARINI et al. 1984; FUCK et al. 1994). No Oeste de Minas gerais e Sudeste de Goiás, o Grupo Canastra apresenta uma disposição estratigráfica característica, iniciando-se por uma seção predominantemente pelítica, sendo composta por duas formações: Formação Serra do Landim e Formação Paracatu.

O depósito Morro do Ouro está encaixado nos filitos carbonosos da base da Formação Paracatu, Membro Morro do Ouro (FREITAS - SILVA, 1996), do Grupo Canastra (ALMEIDA, 1967;



DARLENE, 1978; CAMPOS NETO, 1979). Regionalmente, o Membro Morro do Ouro inicia-se por filitos carbonosos, tendo em sua base um fino, mais persistente nível de quartzito (2 a 12 m de espessura). Para o topo, os filitos carbonosos passam gradacionalmente aos sericita - quartzo, filitos do Membro Serra da Anta da mesma Formação (FREITAS - SILVA et. al. 1996).

#### **4.5.3. Mineralogia**

De acordo com ZINNI et al (1988), após algumas análises e interpretações nos diversos tipos de minério da Mina do Morro do Ouro, observou-se que a mineralogia tanto em relação aos minerais essenciais, quanto em relação aos acessórios, é muito semelhante entre os tipos. E uma forma geral, são compostos predominantemente por mica branca (muscovita e illita) e quartzo, que juntos perfazem mais de 85% da composição do minério. Os minerais acessórios são: clorita, albita, anatásio, siderita e caolinita. As médias de cada um deles ficam abaixo de 5%, mostrando discretas variações entre os tipos, mas que, quando correlacionados entre si, podem ser bastante úteis na discriminação dos tipos. Os minerais traços presentes são: rutilo, galena, esfalerita, ilmenita, goethita, pirita e arsenopirita. Matéria carbonosa pode atingir até 1%.

#### **4.5.4. Lavra e Beneficiamento**

O depósito da Mina do Morro do Ouro possui 3,5 x 2,0 km, tendo o eixo de maior comprimento SW-NE e uma espessura média de 40 m na zona oxidada. A lavra do minério da Mina do Morro do Ouro foi planejada inicialmente em blocos de 100 x 100 x 8 m, com teor de corte de 0,40 g/ton, executada no início por empresa contratada, utilizando escavadeiras tipo H55, D8L e CAT 966/980, e caminhões RK-425 (25 ton). Com o desenvolvimento do processo de beneficiamento e a evolução dos custos globais, a produção passou para 13,5 milhões de toneladas anuais, possibilitando a lavra de teores mais baixos e investimentos em equipamentos de lavra próprios, utilizando D10N, CAT 992 e caminhões CAT 777C (80 ton). O bloco de lavra continua com as mesmas dimensões, mas com teor de corte de 0,33 g/ton Atualmente as reservas são da ordem de 290 milhões de toneladas com 0,444 g/ton Nestas reservas estão incluídas a ampliação da reserva original e a de minério não oxidado. Investimentos estão sendo efetuados para uma alimentação de 18 milhões de toneladas por ano, com estudo para a viabilização do minério sulfetado.

O beneficiamento do minério consiste em britagem de 100% a 25 mm, moagem com 92% passando na malha de 100 #, flotação, concentração gravimétrica, onde são extraídos 30-35% do ouro e enviados diretamente para a lixiviação, eluição, eletrodeposição e fundição.

#### 4.5.5. Rejeito utilizado nesta pesquisa

O material utilizado para as simulações realizadas no ESDH foi um rejeito proveniente do processo de beneficiamento do minério de ouro extraído da Mina do Morro do Ouro de propriedade da Empresa Rio Paracatu Mineração, Paracatu - MG. A amostra foi coletada na própria área de deposição, em uma região próxima ao ponto de descarga da lama. A amostra de cerca de 5 ton foi enviada ao Laboratório de Estruturas/Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil, da Faculdade de Tecnologia na Universidade de Brasília, local onde encontra-se instalado o ESDH. É importante ressaltar que esta quantidade de amostra foi necessária para evitar que houvesse algum tipo de alteração no comportamento do material provocado pelo reuso do material. Além disso, uma maior quantidade de material tende a agilizar as simulações evitando perdas de tempo com a secagem devido à reutilização de amostras.

O rejeito produzido possui uma granulometria medianamente uniforme na faixa de areia fina a média. A Figura 4.3 ilustra a curva granulométrica típica do rejeito da Mina do Morro do Ouro e a Tabela 4.2 apresenta o resumo das principais características típicas deste rejeito.

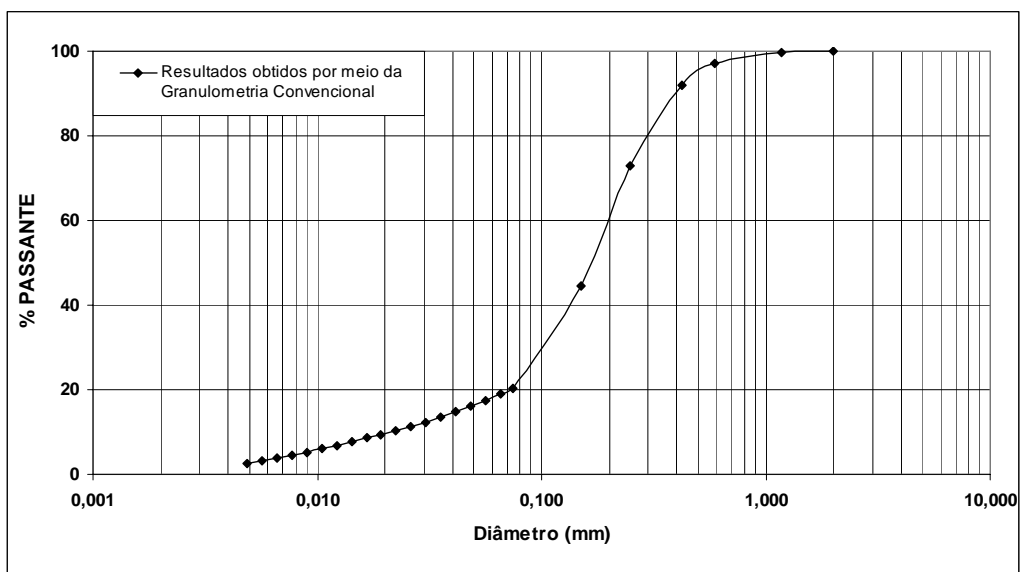


Figura 4.3 - Curva granulométrica típica do rejeito da Mina do Morro do Ouro.

Tabela 4.2 - Características do rejeito da Mina do Morro do Ouro.

<b>D<sub>10</sub> (mm)</b>	<b>D<sub>50</sub> (mm)</b>	<b>D<sub>90</sub> (mm)</b>	<b>Cu</b>
0,02	0,17	0,41	10

## **4.6. ENSAIOS COMPLEMENTARES**

### **4.6.1. Geometria do Canal**

Para obtenção do perfil representativo dos depósitos formados, foram realizadas medições da altura e inclinação da praia em pontos situados a cada 10 cm, até o limite final do canal. Todas estas medidas tiveram como referência a borda superior do canal do ESDH. Ressalta-se que o controle de vazão e concentração foi monitorado durante todo o período de realização do ensaio, garantido que as condições impostas no início do ensaio fossem plenamente satisfeitas.

### **4.6.2. Granulometria**

Os ensaios de granulometria foram realizados seguindo-se as recomendações da NBR 7181 (ABNT, 1984). Ressalta-se também, que foram feitas algumas baterias de ensaios utilizando-se o granulômetro a laser, no intuito de comparar às curvas granulométricas obtidas para cada situação e possivelmente utilizar este procedimento na rotina das análises. As amostras foram coletadas no ponto de descarga, a 20 cm do mesmo e daí em diante seguindo uma progressão geométrica de razão 2 até o limite final da praia.

### **4.6.3. Massa Específica dos Grãos**

A determinação da massa específica dos grãos foi conduzida segundo as recomendações da NBR 6508 (ABNT, 1984) e teve como objetivo obter as variações deste parâmetro em função do processo de segregação via deposição hidráulica. De forma análoga aos pontos de coleta mencionados no ensaio de granulometria, foram coletadas as amostras para avaliar a massa específica dos grãos ao longo dos depósitos obtidos.

#### **4.6.4. Densidade In-Situ**

Os ensaios de densidade in-situ foram realizados utilizando um cilindro biselado de parede fina (2 mm) com 47,5 mm de diâmetro interno e 55,0 mm de altura. Estes cilindros foram projetados especificamente para este tipo de avaliação considerando as características geométricas do depósito e facilidade na operação de amostragem no ESDH (RIBEIRO, 2000 & HERNANDEZ, 2005). Como procedimento para coleta de amostras foram adotadas as recomendações propostas por RIBEIRO (2000) e aperfeiçoadas por HERNANDEZ (2005), enfatizando a necessidade de deixar a praia em repouso cerca de 24 a 48 h para completa drenagem do excesso de água no final do canal. As amostras foram coletadas a cada 10 cm nos primeiros 60 cm distantes do ponto de lançamento e em seguida a cada 20 cm até o término da praia. Vale destacar também o cuidado no processo de cravação do cilindro amostrador para que não houvesse nenhuma perturbação na amostra.

Adicionalmente às medidas das densidades obtidas, foram feitas avaliações no teor de umidade do depósito a partir dos mesmos pontos. Assim, o teor de umidade foi obtido considerando o material coletado em cada cilindro de cravação.

#### **4.6.5. Permeabilidade Saturada**

Para avaliação da permeabilidade foram realizados ensaios de infiltração ao longo do depósito em função da distância da praia formada com relação ao ponto de descarga. Para estes ensaios utilizaram-se pequenos cilindros de parede fina cravados em pontos ao longo da praia a cada 30 cm, a partir da distância de 5 cm do ponto de lançamento do rejeito. Estes ensaios foram repetidos pelo menos 3 vezes em cada ponto objetivando obter uma média representativa neste parâmetro. Os procedimentos utilizados nestes ensaios foram baseados na metodologia proposta por HVORSLEV (LAMBE & WHITMAN, 1994) que permite realizar uma estimativa da permeabilidade utilizando um cilindro de parede delgada cravada no solo. A Equação 4.2 apresenta a relação proposta HVORSLEV para condições de carga variável.

$$K_v = \frac{\frac{\pi \cdot D}{11 \cdot m} + L}{t_2 - t_1} \cdot \frac{H_1}{H_2} \quad (4.2)$$

Onde:  $k_v$  - permeabilidade vertical no solo (mm/s);

$D$  - diâmetro da amostra na câmara (mm);

$L$  - comprimento da amostra (mm);

$H_{1,2}$  - carga piezométrica no tempo  $t_{1,2}$  (mm);

$t_{1,2}$  - tempo (s)

$m$  - razão de transformação  $m = (k_h/k_v)^{(1/2)}$

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 5.1. INTRODUÇÃO

As simulações realizadas no ESDH constituem um dispositivo importante para o estudo e entendimento da técnica de disposição de rejeitos por meio de deposições hidráulicas. Assim, baseando-se nesse fato, o programa experimental realizado nesta pesquisa adotou uma variação nos valores de concentração e vazão, de forma a possibilitar uma avaliação qualitativa nas características dos depósitos formados em cada um dos ensaios. Observou-se que para este tipo de simulação, os resultados encontrados podem ser de grande importância na elaboração de projetos de barragens de rejeitos em empreendimentos mineiros, bem como permitem avaliar viabilidade ou não da técnica de aterros hidráulicos aplicada a um determinado tipo de rejeito. Em se tratando da disposição de rejeitos, a justificativa no uso do ESDH para obtenção de parâmetros geotécnicos, se dá em função da avaliação qualitativa do tempo de vida útil do depósito, além de permitir uma projeção da geometria a ser formada, em função de cada deposição simulada.

Para o presente trabalho, a finalidade em utilizar o ESDH foi de promover uma investigação geotécnica da influência das variáveis de deposição hidráulica associadas ao processo de formação das barragens de rejeito de minério de ouro utilizando a técnica do aterro hidráulico. Assim, a partir da investigação e determinação de alguns parâmetros geotécnicos obtidos nas simulações realizadas, tornou-se possível uma avaliação do comportamento dos depósitos formados baseados nas variações encontradas para cada um dos perfis obtidos.

#### 5.2. GEOMETRIA DAS PRAIAS

As geometrias das praias obtidas em cada simulação, em sua maioria, foram similares entre si, de modo que a maior parte das praias possui seus taludes convexos e com baixas inclinações. As Figuras 5.1 a 5.4 ilustram os esquemas representativos de alguns dos perfis obtidos nas simulações realizadas no ESDH e as Figuras 5.5 a 5.13 apresentam todos os perfis obtidos para

os ensaios realizados no ESDH. Convém ressaltar, que visando facilitar as comparações entre esses perfis, utilizou-se a metodologia apresentada por KUPPER et al (1992 a), em que as cristas dos depósitos encontram-se na ordenada 1 m, usualmente conhecida por altura nominal.

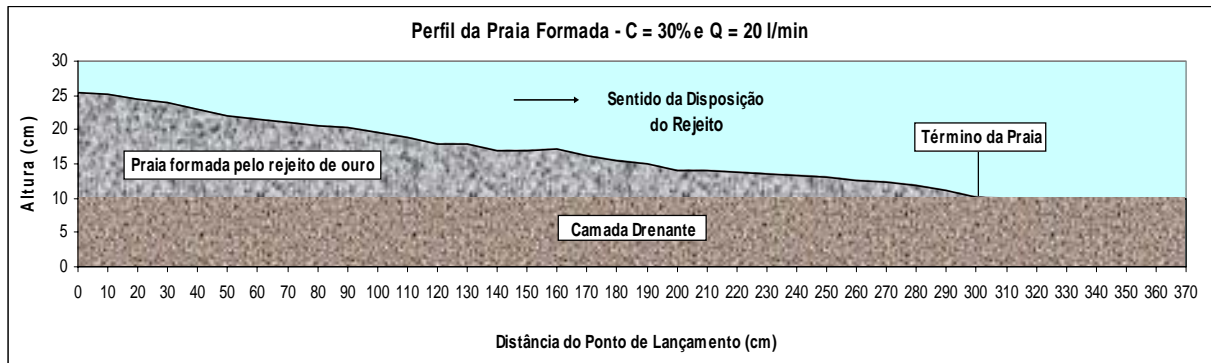


Figura 5.1 - Esquema representativo da praia formada para a simulação C30Q20.

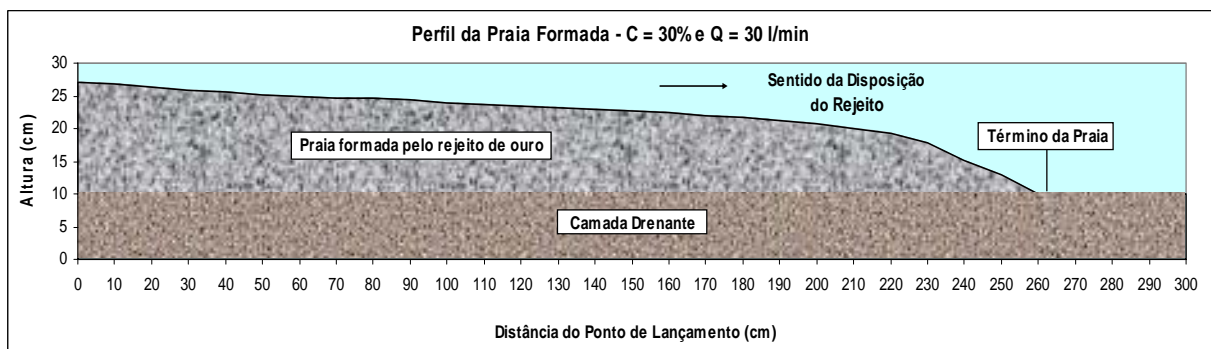


Figura 5.2 - Esquema representativo da praia formada para a simulação C30Q30.

Observando as Figuras 5.1 e 5.2 percebe-se que para a mesma concentração a praia tende a gerar uma inclinação menor à medida que a vazão aumenta. Um outro detalhe a ser destacado nesta mesma situação é que à medida que a vazão aumenta a praia tende a apresentar uma extensão menor. Este fato pode se justificado pelo grande acúmulo de água no interior do ESDH dando origem à formação de uma grande lagoa de decantação que acabou por dificultar o avanço da praia.

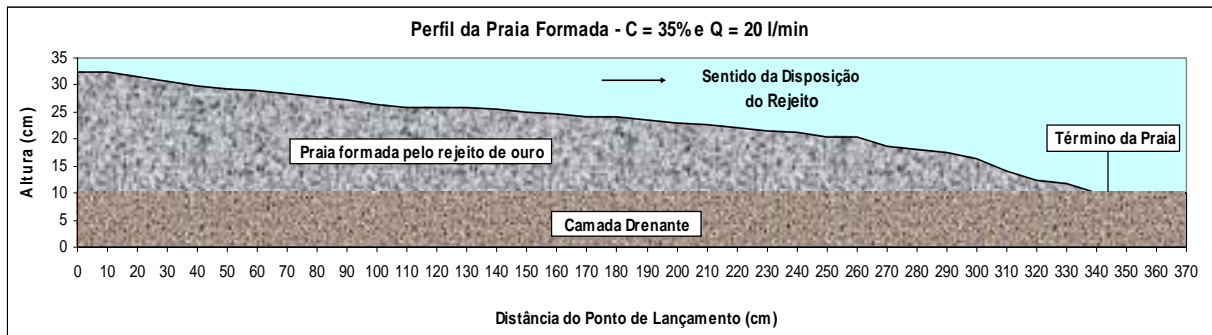


Figura 5.3 - Esquema representativo da praia formada para a simulação C35Q20.

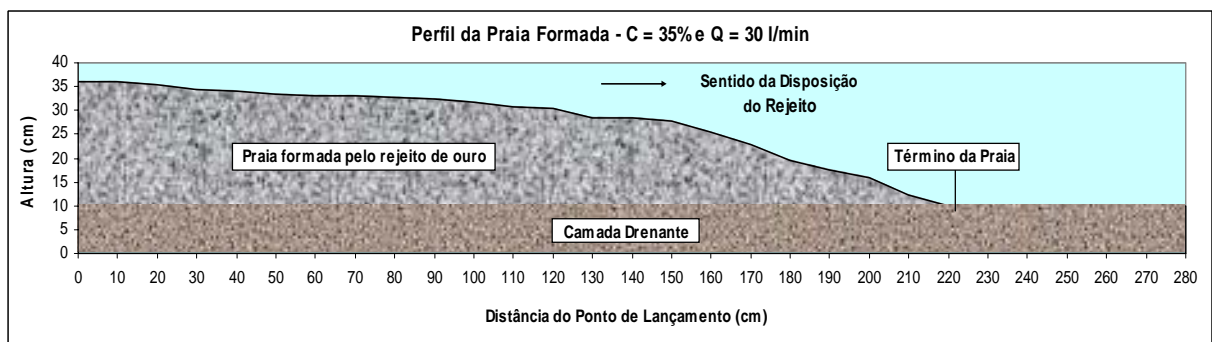


Figura 5.4 - Esquema representativo da praia formada para a simulação C35Q30.

De forma análoga aos comentários feitos sobre as Figuras 5.1 e 5.2, as Figuras 5.3 e 5.4 apresentaram o mesmo comportamento tanto no aspecto das inclinações obtidas quanto na extensão das praias formadas, ou seja, para a mesma concentração à medida que a vazão aumentou a inclinação tornou-se menor e a praia formada teve uma extensão menor.

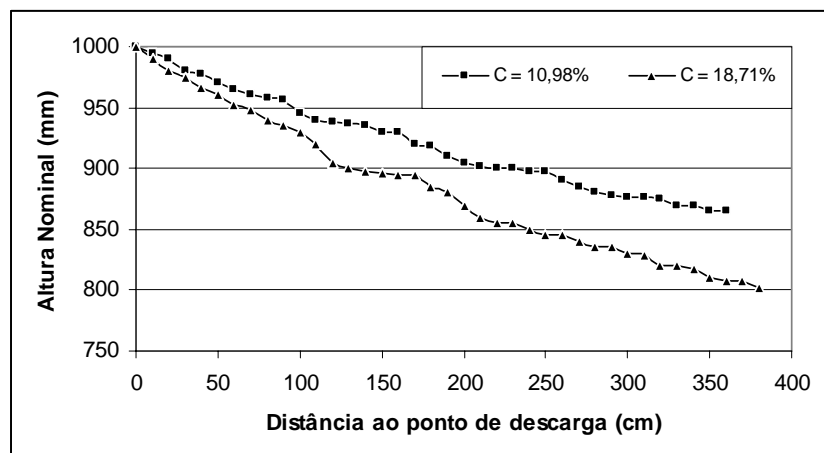


Figura 5.5 - Perfis obtidos para uma Q próxima a 10 l/min e C entre 10,98 e 18,71%.



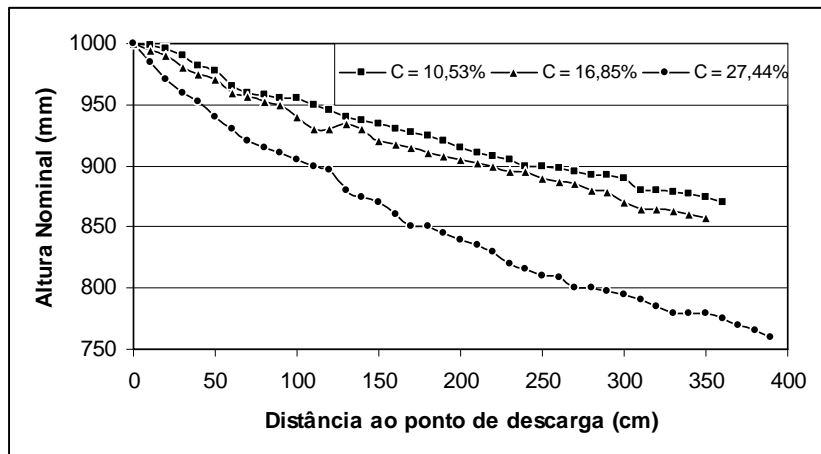


Figura 5.6 - Perfis obtidos para uma Q próxima a 15 l/min e C entre 10,53 e 27,44%.

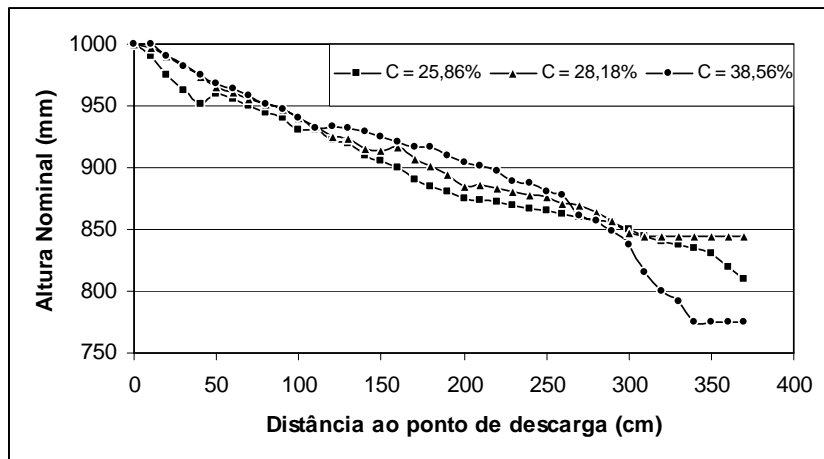


Figura 5.7 - Perfis obtidos para uma Q próxima a 20 l/min e C entre 25,86 e 38,56%.

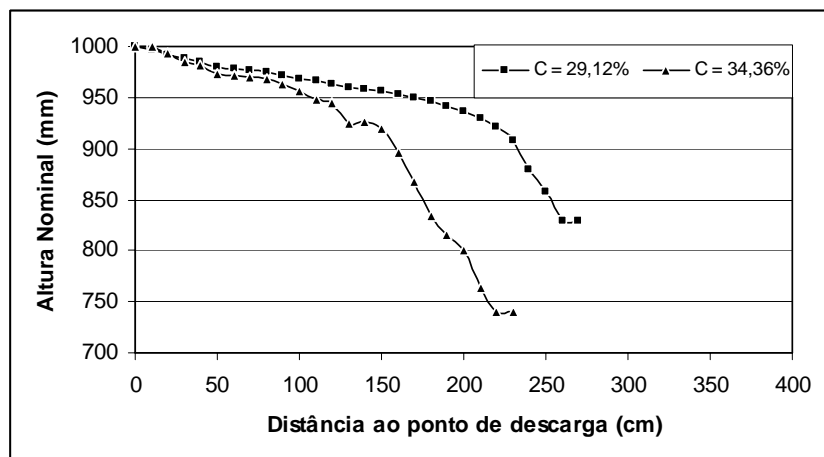


Figura 5.8 - Perfis obtidos para uma Q próxima a 30 l/min e C entre 29,12 e 34,36%.

Analisando as Figuras 5.5 a 5.8, onde tem-se a representação dos perfis obtidos em função das concentrações para cada uma das faixas de vazões adotadas, é possível observar que, na maioria dos casos, à medida que a concentração aumenta a inclinação da praia torna-se mais elevada para uma mesma vazão de descarga.

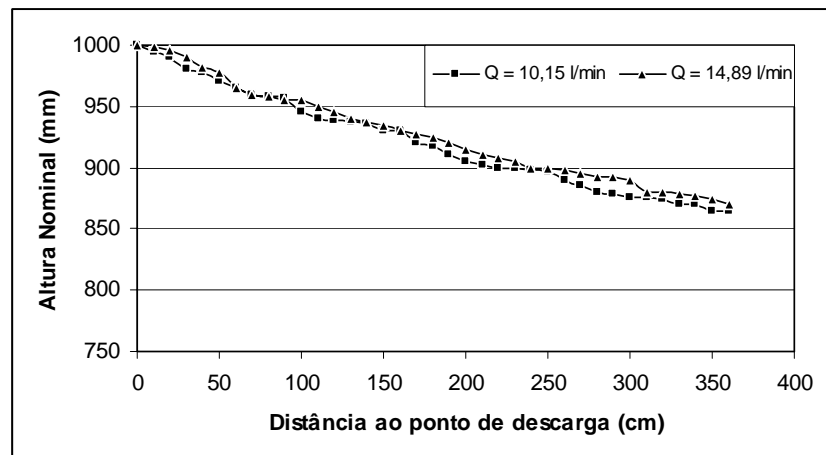


Figura 5.9 - Perfis obtidos para uma C próxima a 10% e Q entre 10,15 e 14,89 l/min.

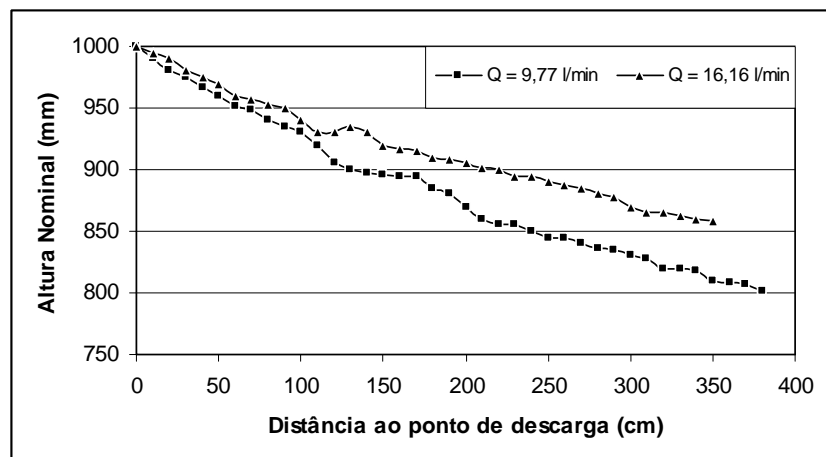


Figura 5.10 - Perfis obtidos para uma C próxima a 15% e Q entre 9,77 e 16,16 l/min.

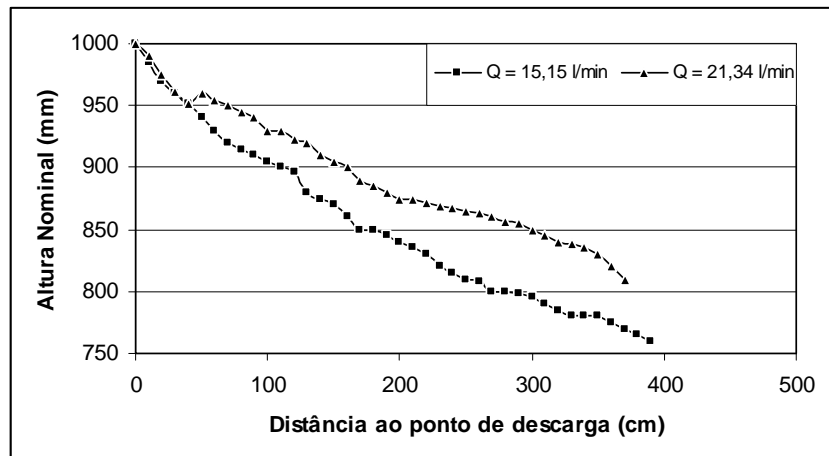


Figura 5.11 - Perfis obtidos para uma C próxima a 25% e Q entre 15,15 e 21,34 l/min.

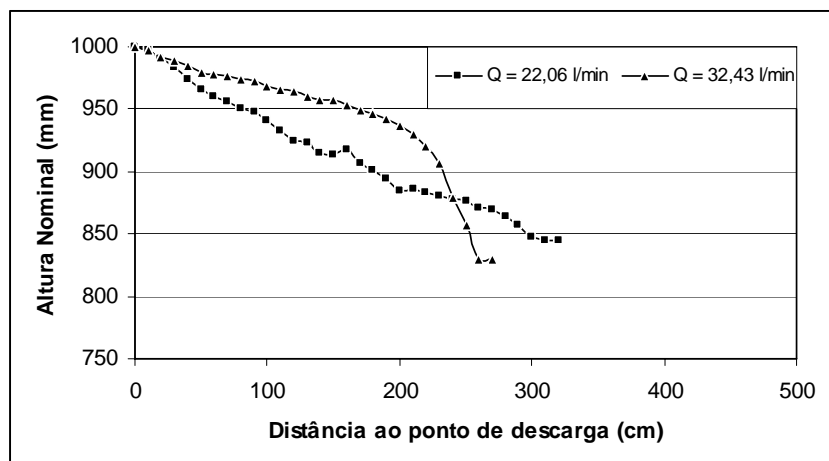


Figura 5.12 - Perfis obtidos para uma C próxima a 30% e Q entre 22,06 e 32,43 l/min.

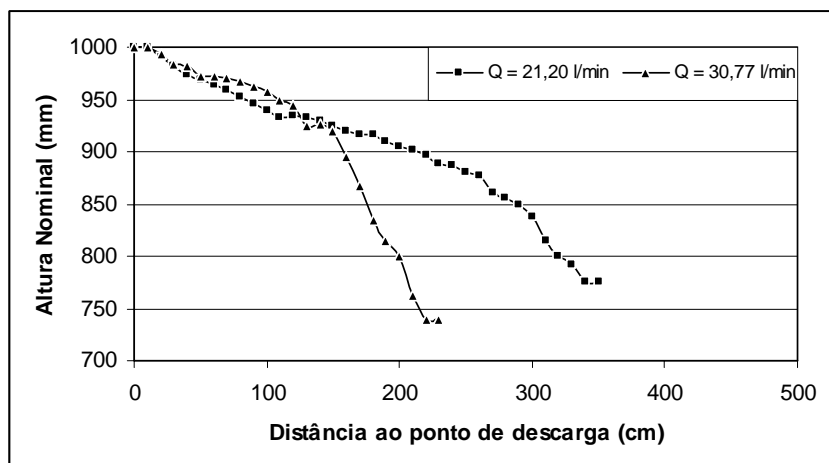


Figura 5.13 - Perfis obtidos para uma C próxima a 35% e Q entre 21,20 e 30,77 l/min.

Por outro lado, fazendo-se uma análise sobre as Figuras 5.9 a 5.13, onde se tem a representação dos perfis obtidos em função das vazões para cada uma das concentrações adotadas, observa-se que, de uma maneira geral, à medida que a vazão aumenta a inclinação da praia torna-se menos elevada para uma mesma concentração. Além disso, é possível observar que as concentrações mais baixas associadas a vazões mais baixas, formam praias mais extensas quando comparadas com as obtidas para concentrações elevadas associadas a vazões elevadas.

Nas Figuras 5.8, 5.12 e 5.13 nota-se uma queda brusca na configuração dos perfis obtidos. Este fato pode estar associado às limitações do ESDH quando se trabalha com concentrações elevadas associadas a vazões elevadas. O sistema de drenos instalados na porção final do ESDH não consegue gerar um processo de drenagem na mesma proporção da descarga da lama no canal fazendo com que a lagoa de decantação no interior do canal se torne maior e, com isso, a praia possua uma extensão menor. Este comportamento pode ser explicado pela forma de deposição, que devido à presença de água, ocorre de forma subaquática. Além disso, ao utilizar concentrações maiores tende-se a obter uma deposição mais próxima da crista.

Num contexto geral, a inclinação das praias formadas tendeu a ser mais acentuada com o aumento da concentração e com o aumento da vazão. As Figuras 5.14 e 5.15 demonstram respectivamente esta tendência.

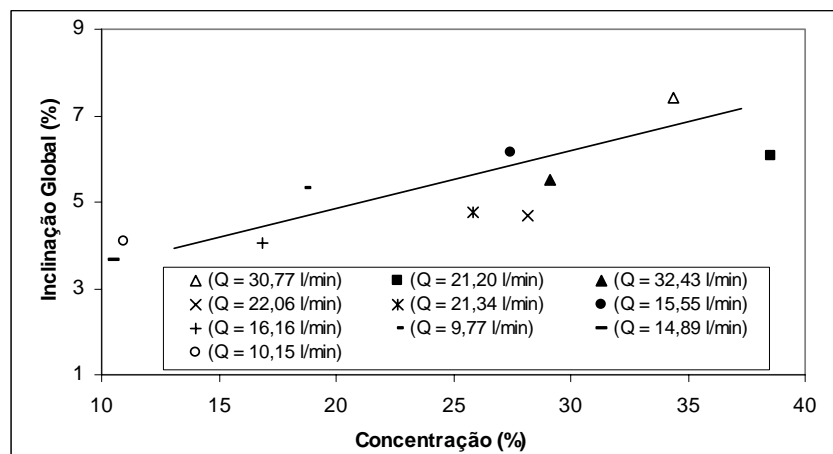


Figura 5.14 - Variação da inclinação global do depósito com a concentração.

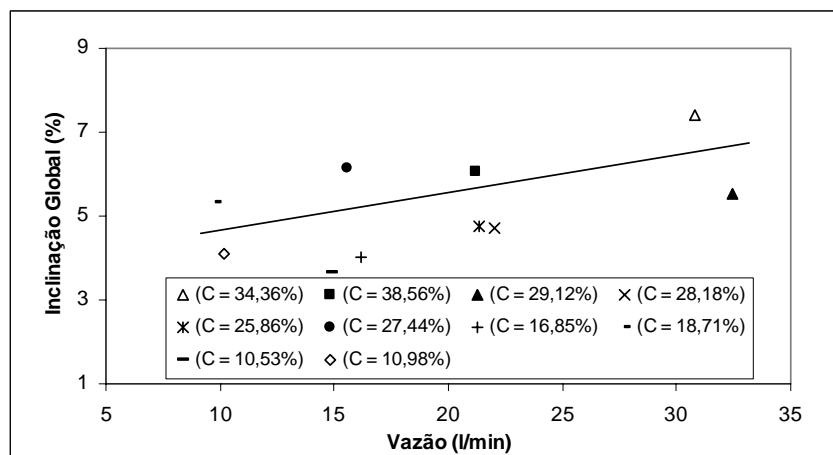


Figura 5.15 - Variação da inclinação global do depósito com a vazão.

Com base nas figuras apresentadas anteriormente pode-se observar, de forma clara, que a geometria das praias formadas são afetadas tanto pelos valores de concentração quanto pelos valores de vazão adotado para cada uma das simulações. Um outro fator importante a ser destacado é que a geometria das praias depende da maneira com que os sedimentos são distribuídos ao longo do canal, ou seja, a segregação hidráulica também afeta o formato final da praia. Segundo RIBEIRO (2000), normalmente a região onde se encontram as partículas mais grossas e/ou mais pesadas tende a apresentar uma inclinação mais acentuada, coincidente de uma forma geral com a porção inicial do depósito.

### 5.3. SEGREGAÇÃO HIDRÁULICA

Como forma de analisar o processo de segregação hidráulica, ocorrido nas simulações realizadas no ESDH, foram feitos ensaios de granulometria, conforme descrições mencionadas no Capítulo 4. De acordo com RIBEIRO (2000), o processo de segregação depende do tipo de fluido, tipo de sedimento, distribuição granulométrica do rejeito, concentração da lama, condições de fluxo e presença de aditivos químicos. As Tabelas 5.1 a 5.3 apresentam os valores obtidos para o  $D_{90}$ ,  $D_{50}$  e  $D_{10}$  em diferentes pontos ao longo do canal e as Figuras 5.16 a 5.48 apresentam o comportamento do  $D_{90}$ ,  $D_{50}$  e  $D_{10}$  ao longo do depósito. As curvas granulométricas obtidas para cada simulação encontram-se apresentadas no Apêndice A.

Tabela 5.1 -  $D_{90}$  em diferentes pontos do depósito.

Distância (m)	D90 (mm)									
	C10Q10	C10Q15	C15Q10	C15Q15	C25Q15	C25Q20	C30Q20	C30Q30	C35Q20	C35Q30
0,0	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,22	0,24	0,42	0,45	0,42
0,2	0,25	0,24	0,25	0,25	0,24	0,25	0,26	0,25	0,3	0,3
0,4	0,41	0,38	0,39	0,38	0,37	0,38	0,35	0,35	0,41	0,28
0,8	0,39	0,39	0,38	0,41	0,38	0,39	0,41	0,42	0,41	0,55
1,6	0,38	0,38	0,37	0,38	0,39	0,38	0,42	0,35	0,42	0,42
2,5	0,45	0,48	0,42	0,39	0,48	0,44	-	-	-	-

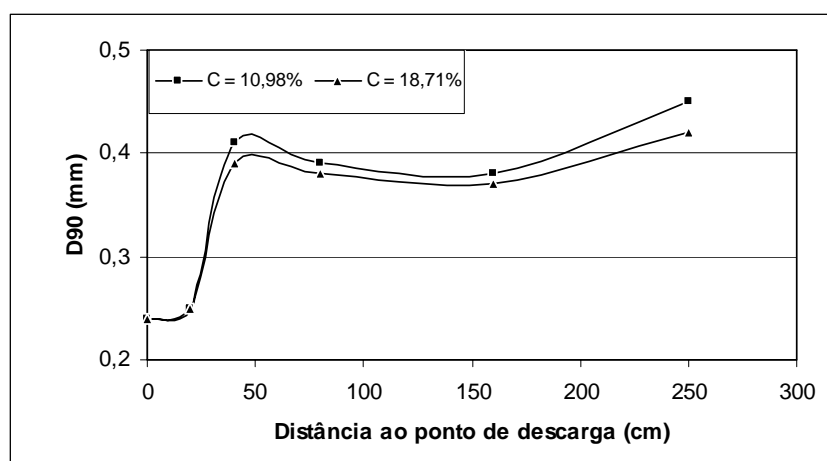


Figura 5.16 - Variação do  $D_{90}$  para  $Q = 10$  l/min e  $C$  entre 10,98 e 18,71%.

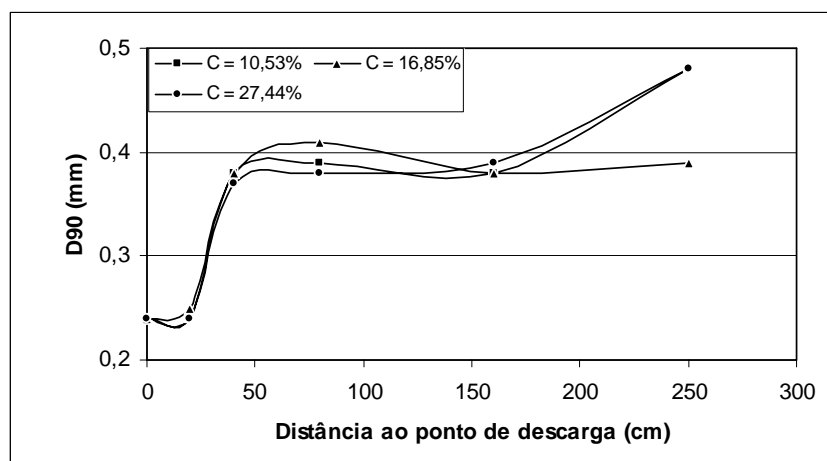


Figura 5.17 - Variação do  $D_{90}$  para  $Q = 15$  l/min e  $C$  entre 10,53 e 27,44%.

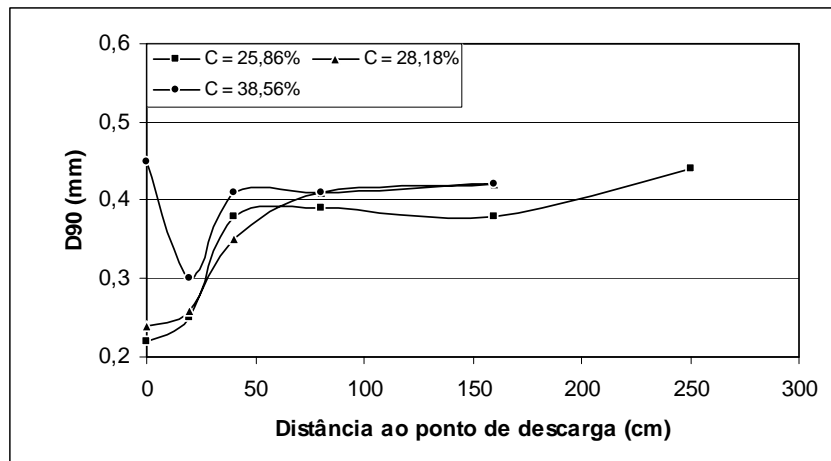


Figura 5.18 - Variação do D<sub>90</sub> para Q = 20 l/min e C entre 25,86 e 38,56%.

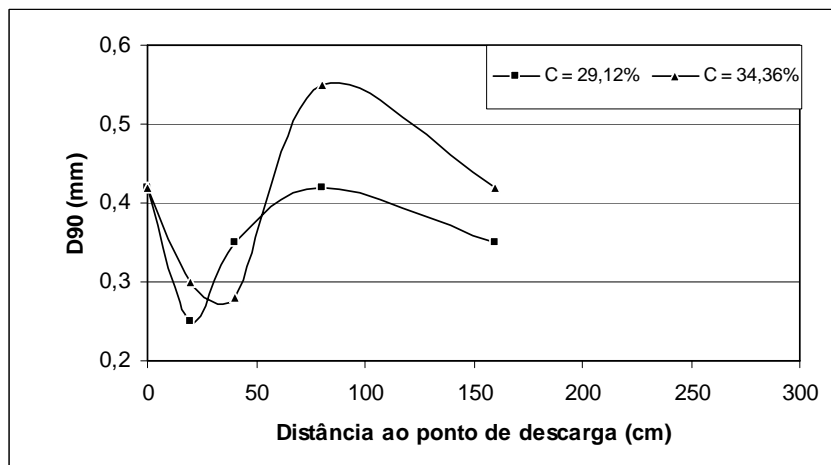


Figura 5.19 - Variação do D<sub>90</sub> para Q = 30 l/min e C entre 29,12 e 34,36%.

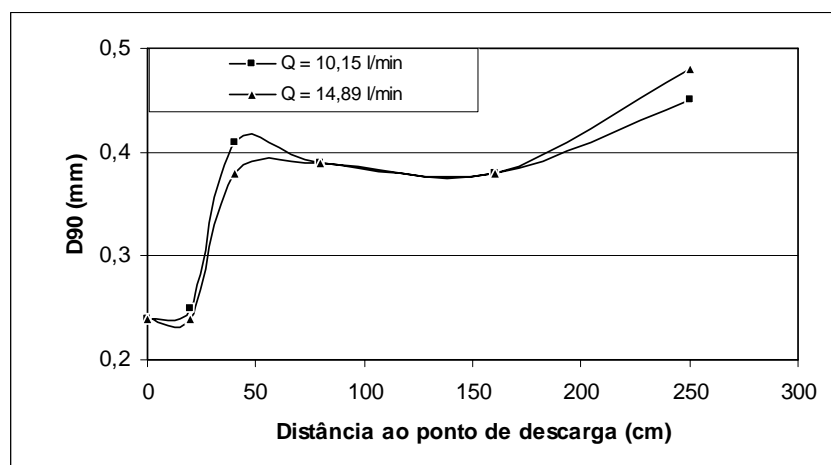


Figura 5.20 - Variação do D<sub>90</sub> para C = 10% e vazões entre 10,15 e 14,89 l/min.

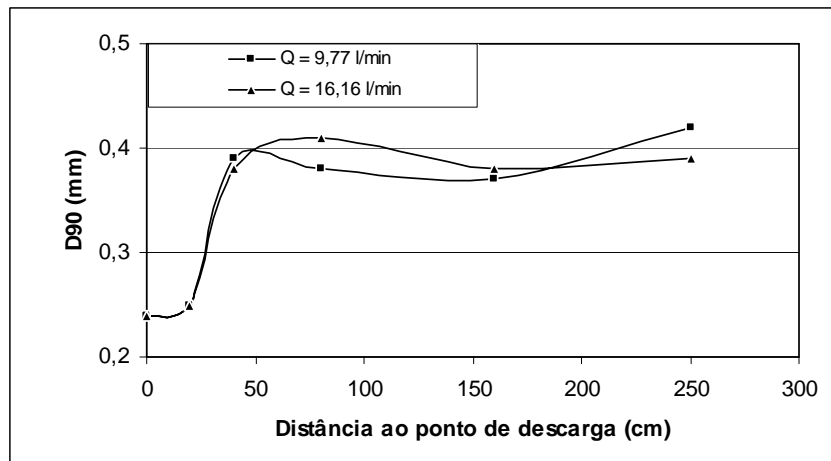


Figura 5.21 - Variação do  $D_{90}$  para  $C = 15\%$  e vazões entre 9,77 e 16,16 l/min.

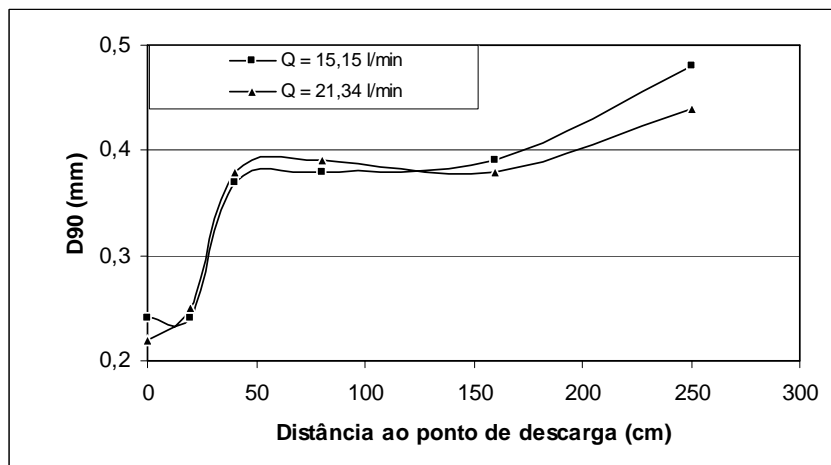


Figura 5.22 - Variação do  $D_{90}$  para  $C = 25\%$  e vazões entre 15,15 e 21,34 l/min.

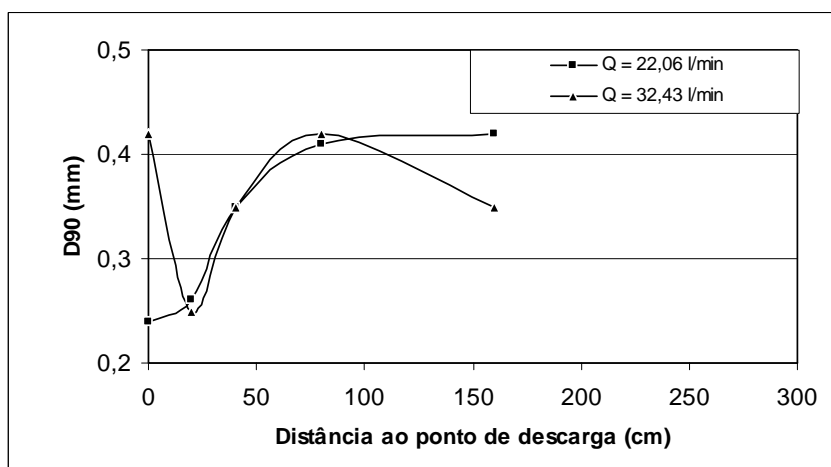


Figura 5.23 - Variação do  $D_{90}$  para  $C = 30\%$  e vazões entre 22,06 e 32,43 l/min.



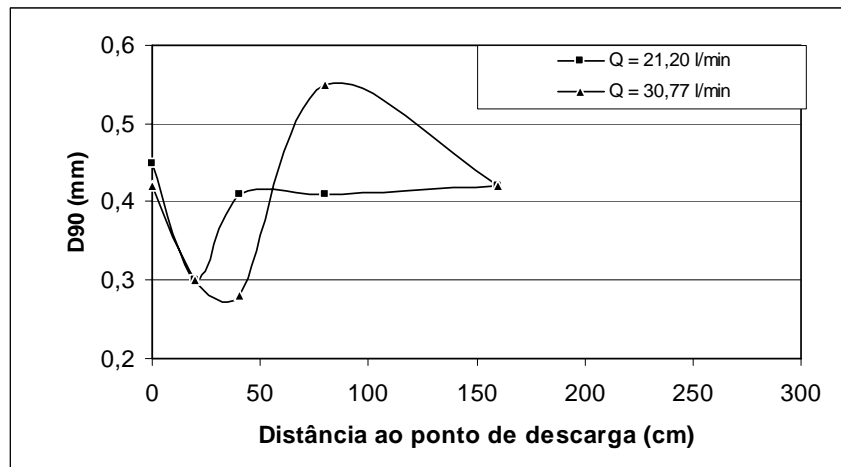


Figura 5.24 - Variação do  $D_{90}$  para  $C = 35\%$  e vazões entre 21,20 e 30,77 l/min.

A partir das figuras representadas anteriormente, infere-se que os valores obtidos para o  $D_{90}$  atingem o seu diâmetro máximo a uma distância próxima de 50 cm do ponto de descarga, em quase todos os casos, excetuando-se os ensaios C30Q20, C30Q30, C35Q20, C35Q30 (Figuras 5.19, 5.23 e 5.24), realizados com elevadas vazões. Após esses 50 cm, o diâmetro tende a permanecer constante até os 150 cm e daí em diante não é possível estabelecer uma tendência no comportamento, face às grandes oscilações apresentadas.

Tabela 5.2 -  $D_{50}$  em diferentes pontos do depósito.

Distância (m)	$D_{50}$ (mm)									
	C10Q10	C10Q15	C15Q10	C15Q15	C25Q15	C25Q20	C30Q20	C30Q30	C35Q20	C35Q30
0,0	0,11	0,18	0,13	0,13	0,13	0,13	0,15	0,2	0,18	0,2
0,2	0,13	0,12	0,12	0,15	0,13	0,13	0,15	0,14	0,15	0,18
0,4	0,18	0,17	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17	0,18	0,17	0,16
0,8	0,19	0,17	0,18	0,19	0,18	0,17	0,19	0,16	0,18	0,22
1,6	0,16	0,16	0,17	0,15	0,18	0,17	0,18	0,15	0,18	0,18
2,5	0,13	0,17	0,17	0,16	0,17	0,16	-	-	-	-

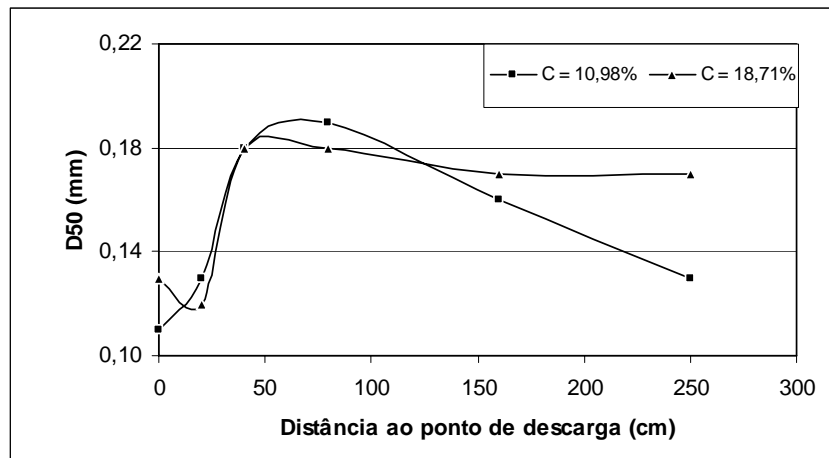


Figura 5.25 - Variação do D<sub>50</sub> para Q = 10 l/min e C entre 10,98 e 18,71%.

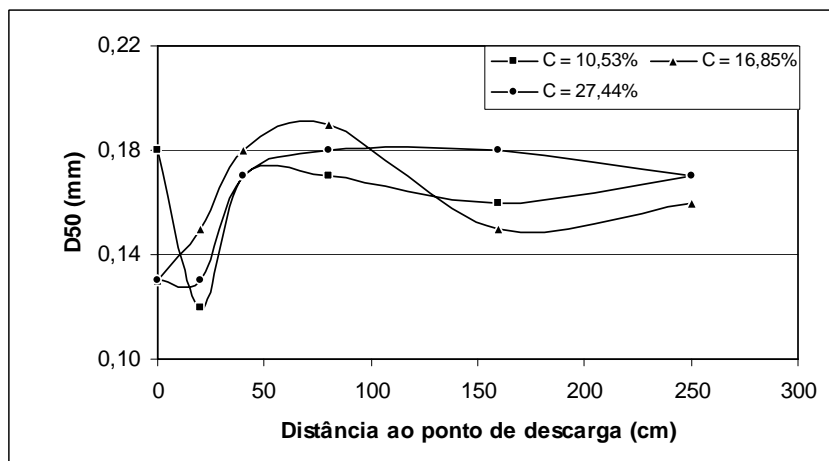


Figura 5.26 - Variação do D<sub>50</sub> para Q = 15 l/min e C entre 10,53 e 27,44%.

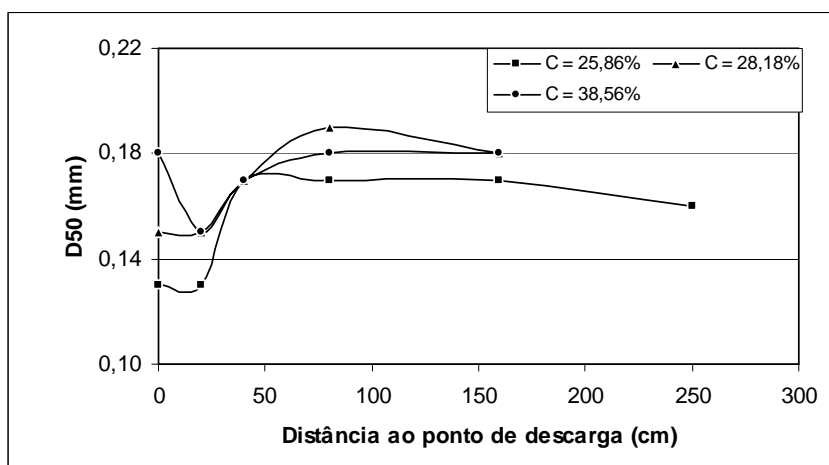


Figura 5.27 - Variação do D<sub>50</sub> para Q = 20 l/min e C entre 25,86 e 38,56%.

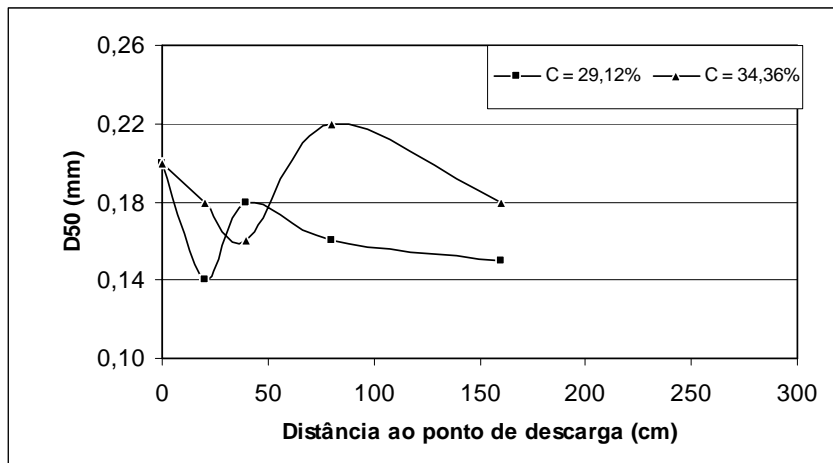


Figura 5.28 - Variação do D<sub>50</sub> para Q = 30 l/min e C entre 29,12 e 34,36%.

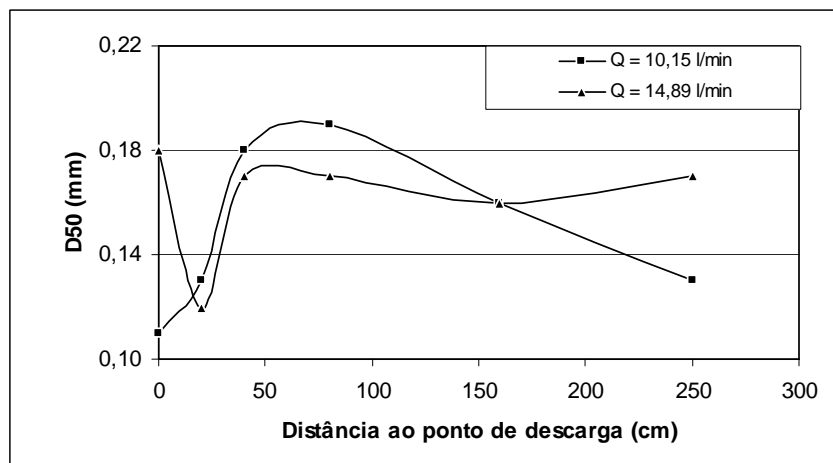


Figura 5.29 - Variação do D<sub>50</sub> para C = 10% e vazões entre 10,15 e 14,89 l/min.

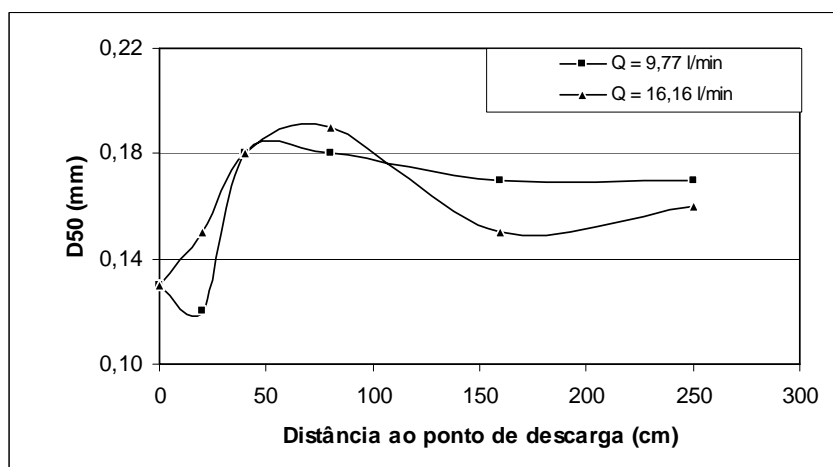


Figura 5.30 - Variação do D<sub>50</sub> para C = 15% e vazões entre 9,77 e 16,16 l/min.

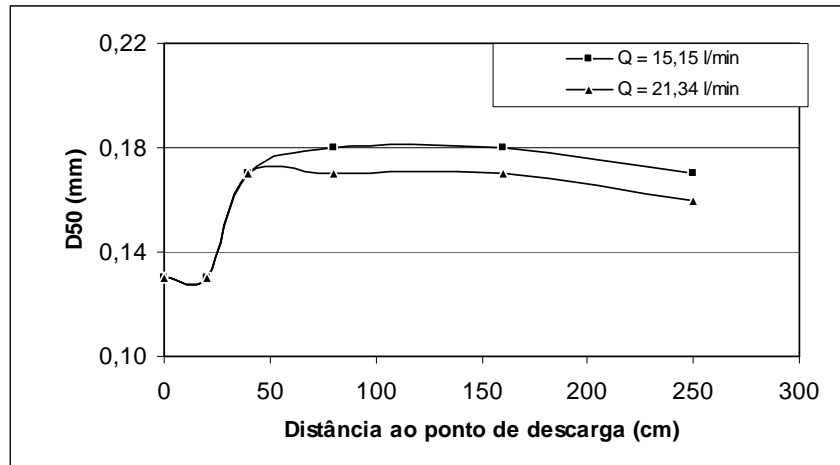


Figura 5.31 - Variação do D<sub>50</sub> para C = 25% e vazões entre 15,15 e 21,34 l/min.

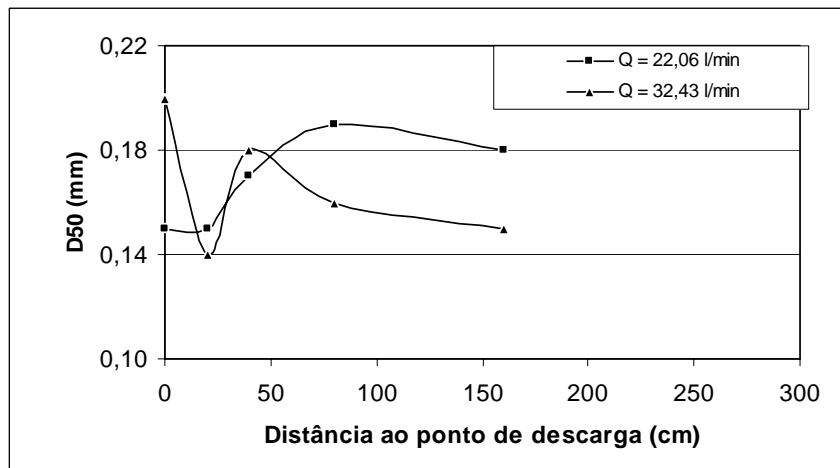


Figura 5.32 - Variação do D<sub>50</sub> para C = 30% e vazões entre 22,06 e 32,43 l/min.

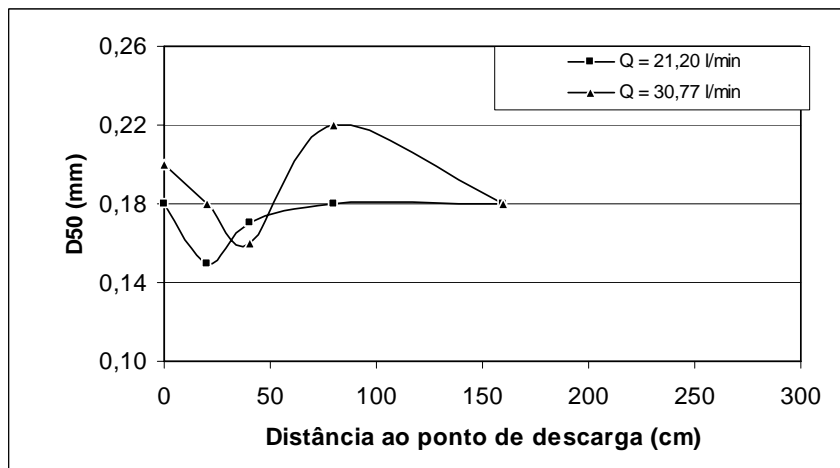


Figura 5.33 - Variação do D<sub>50</sub> para C = 35% e vazões entre 21,20 e 30,77 l/min.

Analisando o  $D_{50}$  observa-se que o seu valor máximo é atingido em torno dos 75 cm distante do ponto de descarga e, logo após esse valor, o  $D_{50}$  tende a permanecer constante até o término da praia. As Figuras 5.34 a 5.37 resume este comportamento. Porém, próximo ao ponto de descarga do material (0,0 m), pode-se observar que à medida que a concentração e a vazão aumentam o  $D_{50}$  tende a possuir valores mais altos, conforme ilustrado nas Figuras 5.38 e 5.39.

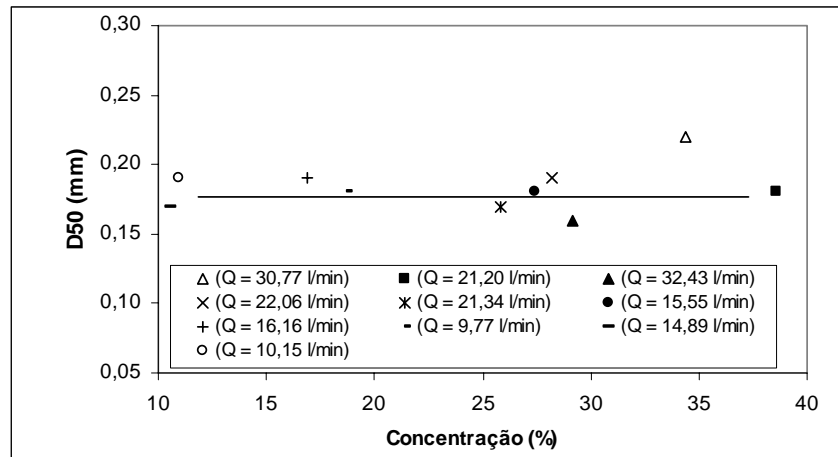


Figura 5.34 - Variação do  $D_{50}$  com a concentração a 0,80 m do ponto de lançamento.

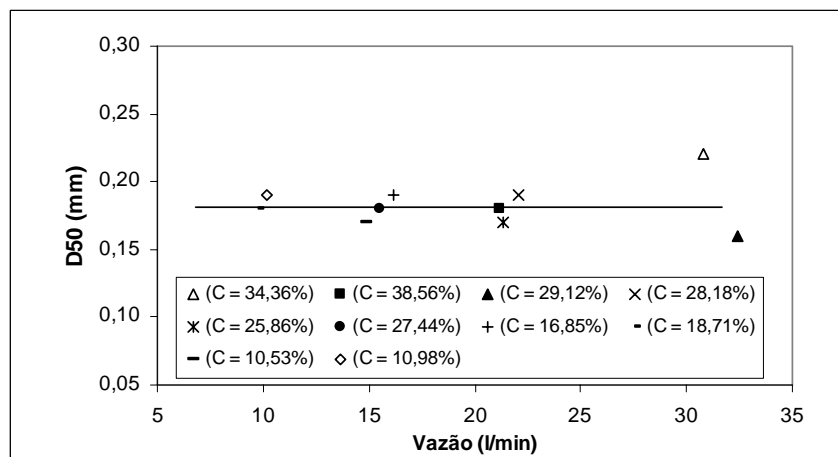


Figura 5.35 - Variação do  $D_{50}$  com a vazão a 0,80 m do ponto de lançamento.

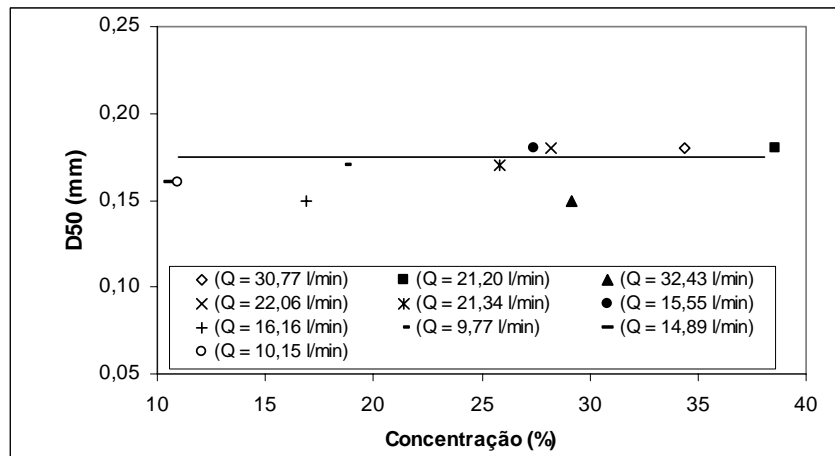


Figura 5.36 - Variação do D<sub>50</sub> com a concentração a 1,60 m do ponto de lançamento.

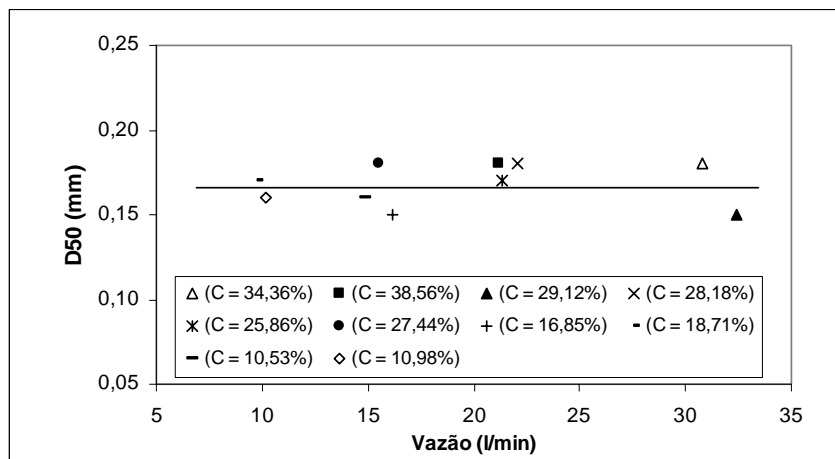


Figura 5.37 - Variação do D<sub>50</sub> com a vazão a 1,60 m do ponto de lançamento.

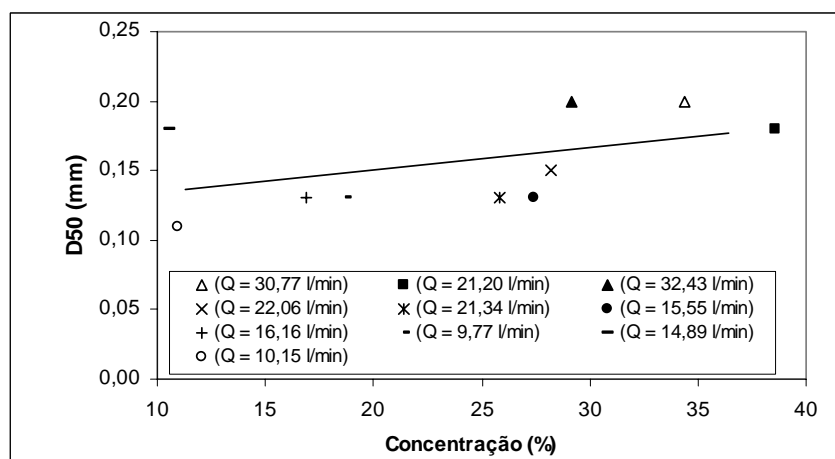


Figura 5.38 - Variação do D<sub>50</sub> com a concentração no ponto inicial de lançamento.

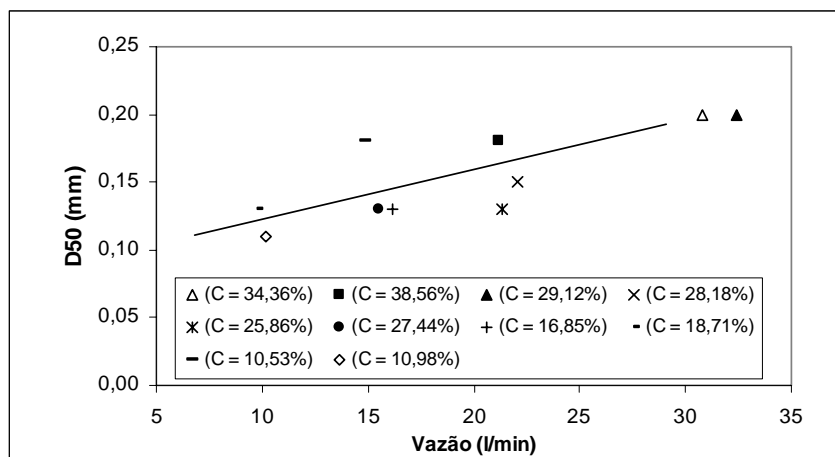


Figura 5.39 - Variação do  $D_{50}$  com a vazão no ponto inicial de lançamento.

Tabela 5.3 -  $D_{10}$  em diferentes pontos do depósito.

Distância (m)	$D_{10}$ (mm)									
	C10Q10	C10Q15	C15Q10	C15Q15	C25Q15	C25Q20	C30Q20	C30Q30	C35Q20	C35Q30
0,0	0,04	0,042	0,054	0,056	0,042	0,042	0,04	0,06	0,06	0,06
0,2	0,04	0,036	0,042	0,056	0,036	0,034	0,045	0,051	0,045	0,055
0,4	0,052	0,052	0,06	0,062	0,046	0,052	0,042	0,05	0,042	0,045
0,8	0,048	0,052	0,062	0,064	0,048	0,054	0,041	0,032	0,038	0,028
1,6	0,04	0,036	0,056	0,054	0,042	0,052	0,039	0,051	0,055	0,035
2,5	0,02	0,025	0,048	0,052	0,032	0,044	-	-	-	-

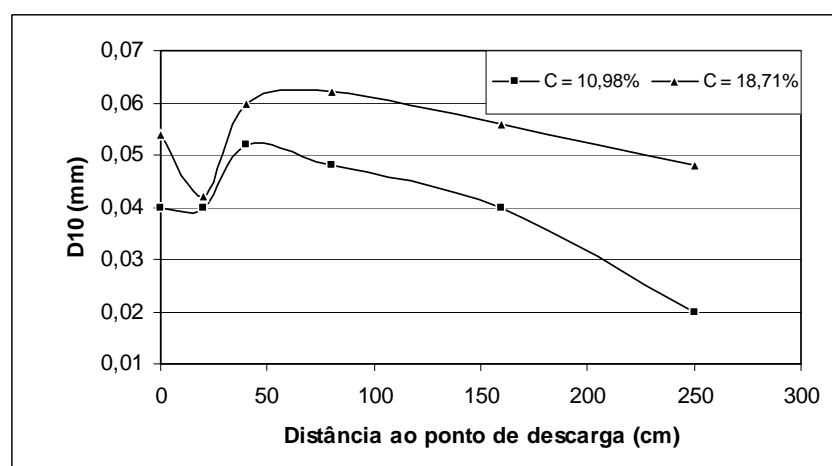


Figura 5.40 - Variação do  $D_{10}$  para  $Q = 10$  l/min e  $C$  entre 10,98 e 18,71%.

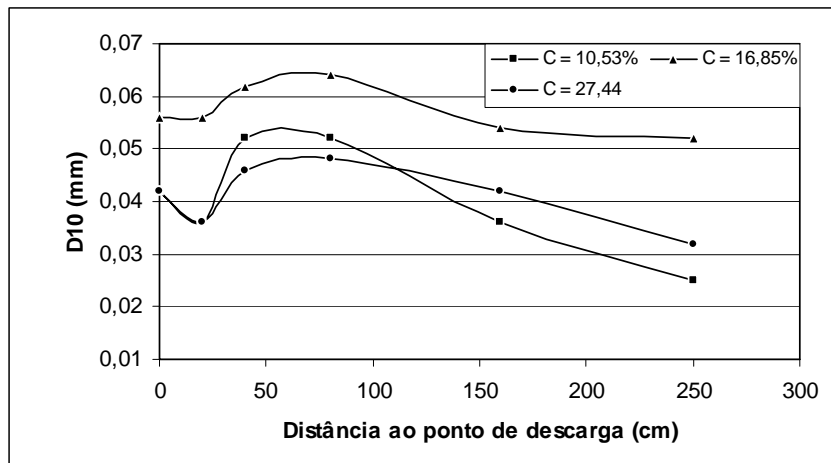


Figura 5.41 - Variação do  $D_{10}$  para  $Q = 15$  l/min e  $C$  entre 10,53 e 27,44%.

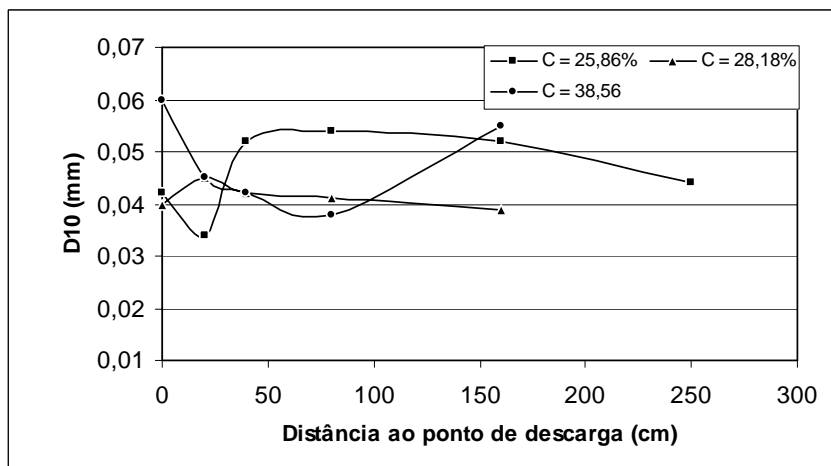


Figura 5.42 - Variação do  $D_{10}$  para  $Q = 20$  l/min e  $C$  entre 25,86 e 38,56%.

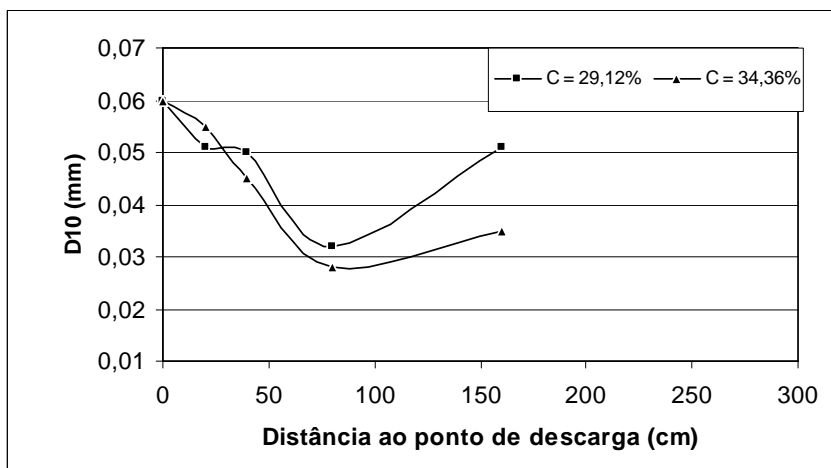


Figura 5.43 - Variação do  $D_{10}$  para  $Q = 30$  l/min e  $C$  entre 29,12 e 34,36%.



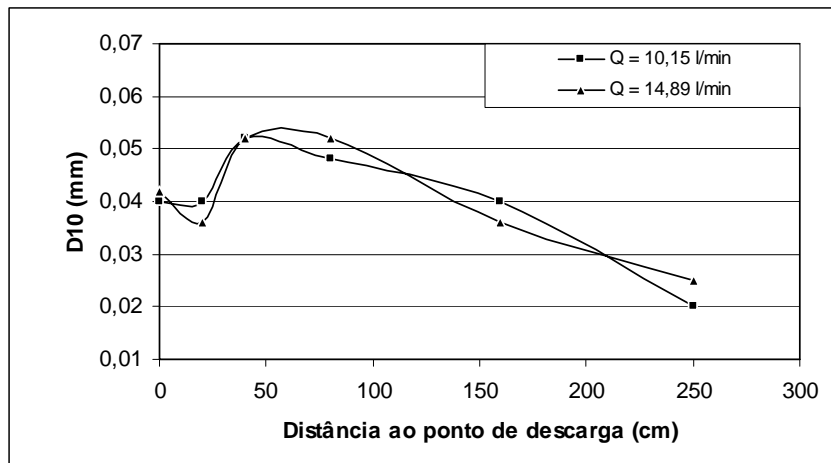


Figura 5.44 - Variação do  $D_{10}$  para  $C = 10\%$  e vazões entre 10,15 e 14,89 l/min.

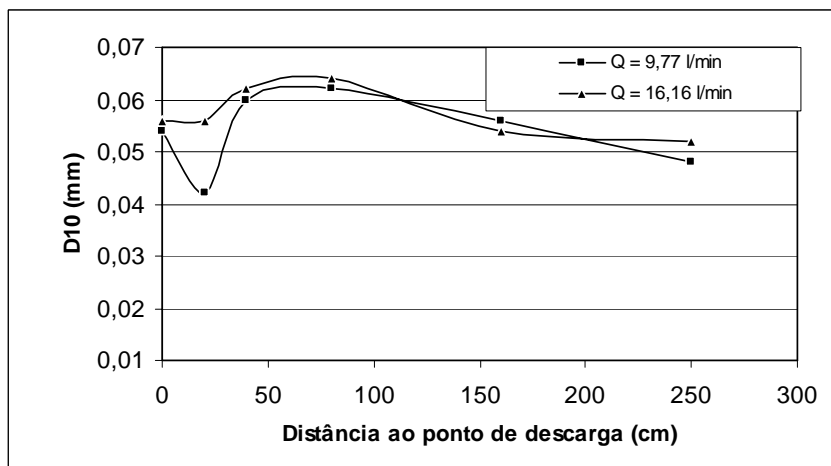


Figura 5.45 - Variação do  $D_{10}$  para  $C = 15\%$  e vazões entre 9,77 e 16,16 l/min.

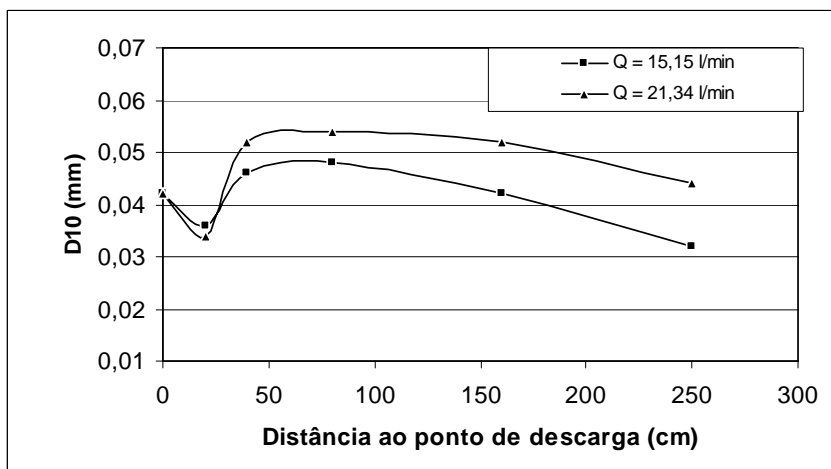


Figura 5.46 - Variação do  $D_{10}$  para  $C = 25\%$  e vazões entre 15,15 e 21,34 l/min.

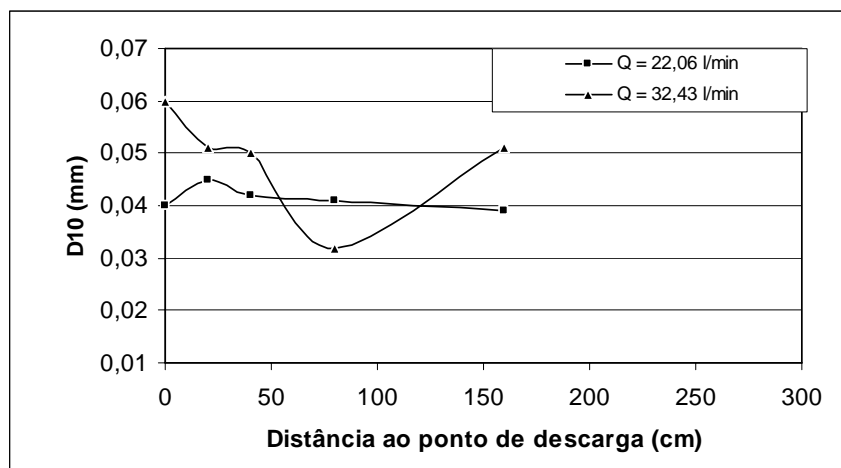


Figura 5.47 - Variação do  $D_{10}$  para  $C = 30\%$  e vazões entre 22,06 e 32,43 l/min.

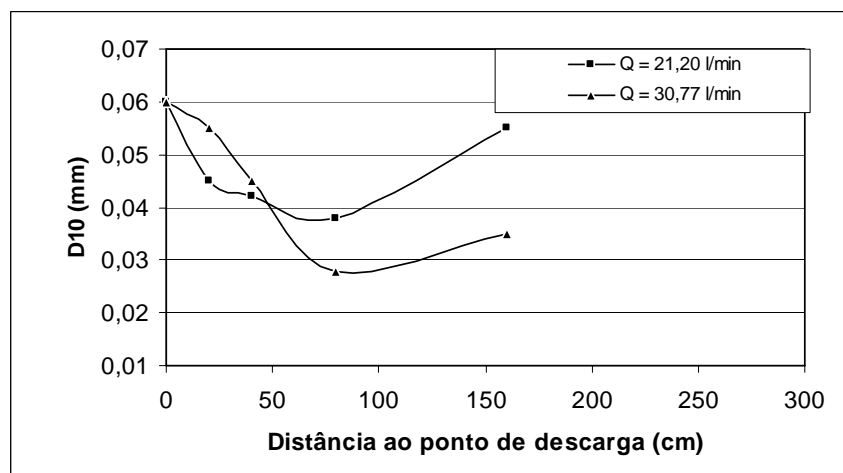


Figura 5.48 - Variação do  $D_{10}$  para  $C = 35\%$  e vazões entre 21,20 e 30,77 l/min.

A variação apresentada pelo  $D_{10}$  revela que o seu valor se torna máximo a 40 cm do ponto de descarga e a partir deste valor ele tende a diminuir até o término da praia, conforme observado nas Figuras 5.40 a 5.48.

De uma forma geral, para as três situações mencionadas anteriormente,  $D_{90}$ ,  $D_{50}$  e  $D_{10}$ , não é possível se estabelecer uma correlação precisa entre a variação granulométrica encontrada e os parâmetros iniciais de fluxo (vazão e concentração), face à complexidade inerente ao processo de segregação hidráulica. De acordo com KUPPER (1991), em alguns casos simulados na literatura, os valores de  $D_{90}$ ,  $D_{50}$  e  $D_{10}$  tendem a aumentar levemente com a distância, porém mesmo

considerando este caso bastante atípico, as causas que geraram esta tendência não foram completamente identificadas. Sabe-se, entretanto, que o mecanismo de transporte é influenciado pela capacidade de arraste do processo de fluxo, mas intimamente ligado às características físicas e mineralógicas do rejeito. Neste sentido, altamente influenciado pela densidade e tamanho das partículas. Entretanto, é possível prever via simulações em laboratório a possível concentração de determinado diâmetro de grãos em regiões específicas do depósito.

#### 5.4. PESO ESPECÍFICO DOS GRÃOS

Face à particularidade do processo de segregação hidráulica ao longo do canal, foram feitas análises do peso específico dos grãos em relação ao ponto de descarga. Como justificativa para a análise desse parâmetro, ressalta-se a importância de um melhor entendimento do que ocorre no processo de segregação hidráulica, onde não só o peso do grão ou o seu volume definem o local de deposição, mais sim, a combinação desses dois elementos que irão governar todo o acondicionamento dos sedimentos, ao longo do depósito a ser formado. A Tabela 5.4 apresenta os resultados obtidos para os  $\gamma_s$  em diferentes pontos no interior do canal, para todas as simulações realizadas no ESDH. As Figuras 5.49 a 5.57 apresentam o comportamento do peso específico dos grãos para as vazões e concentrações ensaiadas.

Tabela 5.4 - Peso específico dos grãos em diferentes pontos do depósito.

Distância (m)	Peso Específico dos Grãos (kN/m <sup>3</sup> )									
	C10Q10	C10Q15	C15Q10	C15Q15	C25Q15	C25Q20	C30Q20	C30Q30	C35Q20	C35Q30
0,0	29,90	30,30	32,40	30,70	31,40	30,60	28,25	28,40	28,60	28,10
0,2	27,60	29,40	28,70	28,40	29,00	30,00	27,82	27,89	29,28	29,18
0,4	28,30	27,90	27,90	29,20	27,70	28,00	28,37	27,64	29,28	28,55
0,8	27,80	27,70	28,40	29,30	27,80	27,20	26,96	26,64	29,21	30,09
1,6	28,00	27,50	28,00	27,80	27,30	26,90	27,03	27,18	27,33	25,92
2,8	26,80	27,00	27,20	26,50	27,10	26,70	25,49	27,20	27,26	25,90
5,0	26,00	27,30	26,70	26,10	26,50	26,70	26,50	29,30	25,30	29,40

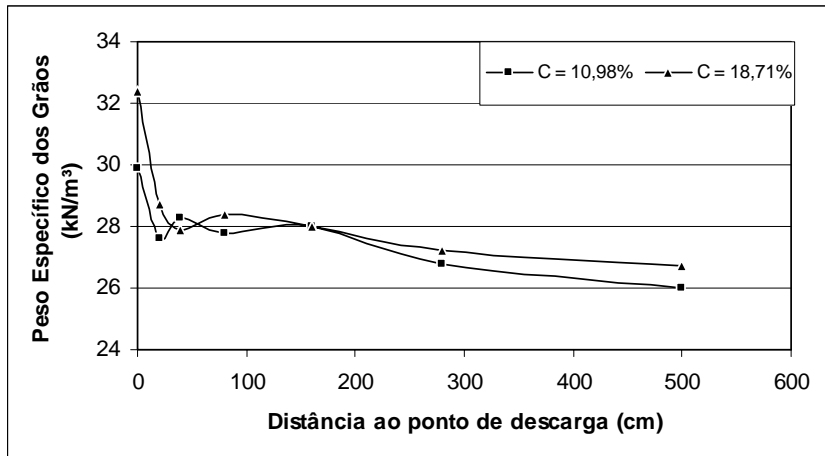


Figura 5.49 - Variação do  $\gamma_s$  para uma Q próxima a 10 l/min e C entre 10,98 e 18,71%.

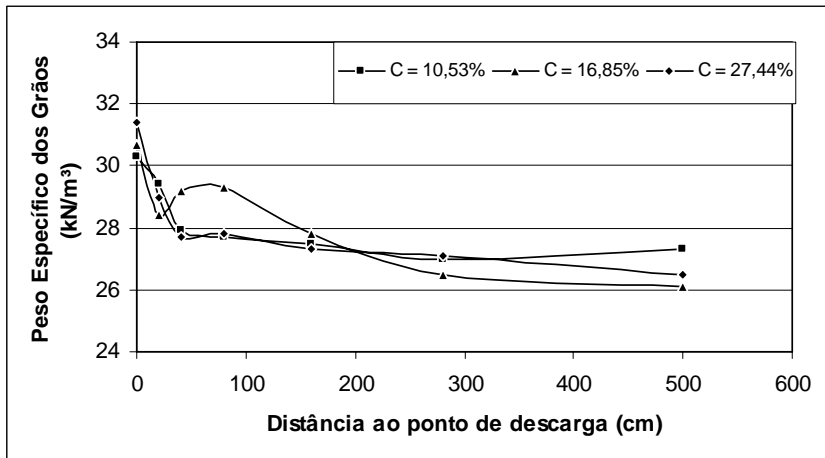


Figura 5.50 - Variação do  $\gamma_s$  para uma Q próxima a 15 l/min e C entre 10,53 e 27,44%.

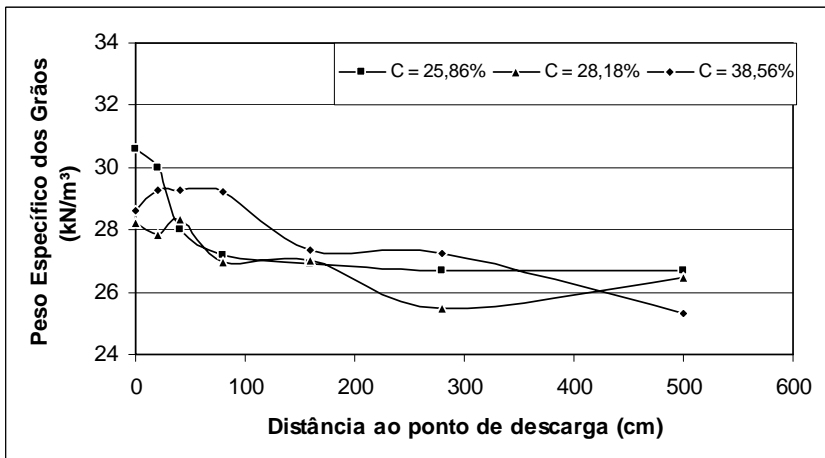


Figura 5.51 - Variação do  $\gamma_s$  para uma Q próxima a 20 l/min e C entre 25,86 e 38,56%.

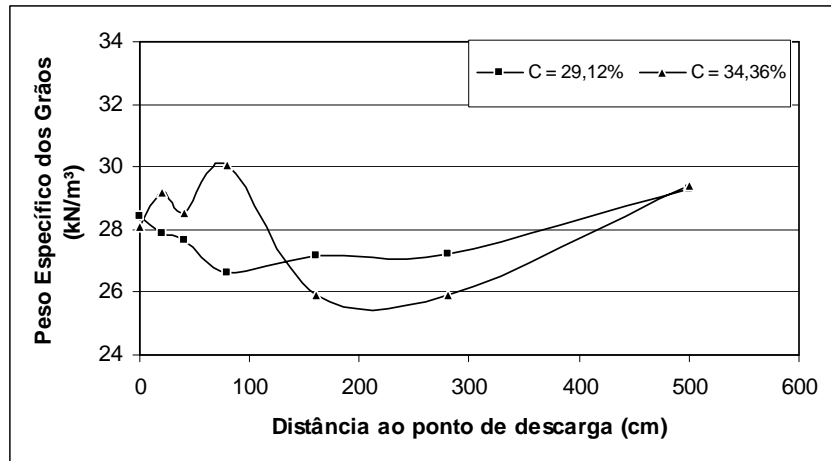


Figura 5.52 - Variação do  $\gamma_s$  para uma Q próxima a 30 l/min e C entre 29,12 e 34,36%.

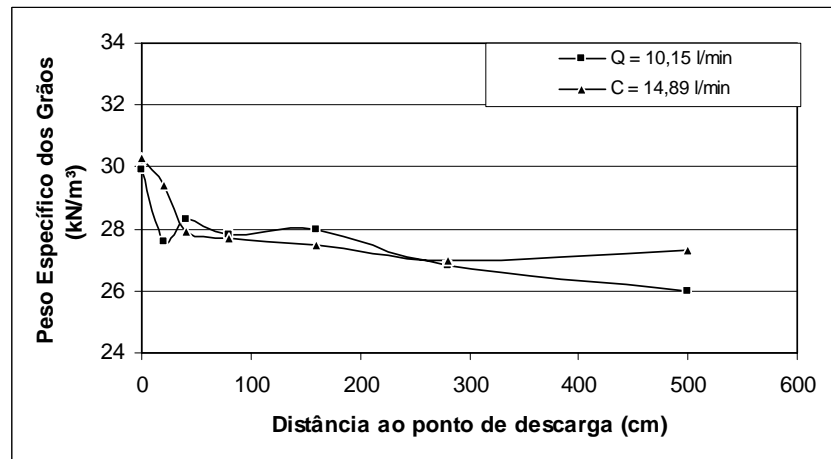


Figura 5.53 - Variação do  $\gamma_s$  para uma C próxima a 10% e Q entre 10,15 e 14,89 l/min.

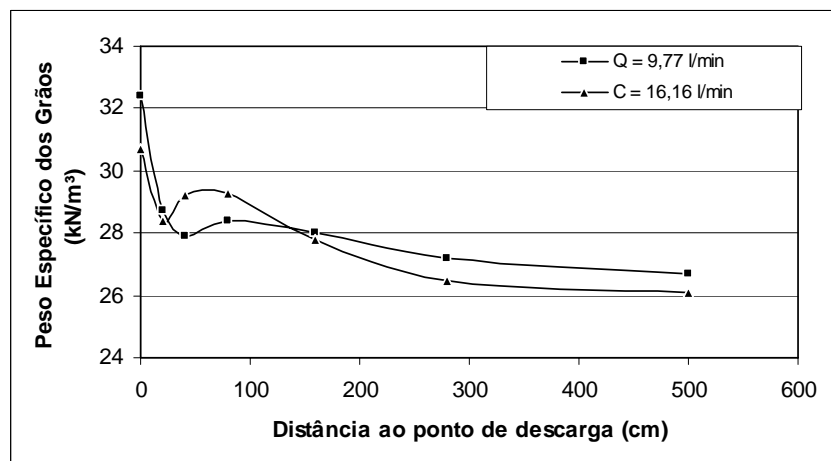


Figura 5.54 - Variação do  $\gamma_s$  para uma C próxima a 15% e Q entre 9,77 e 16,16 l/min.

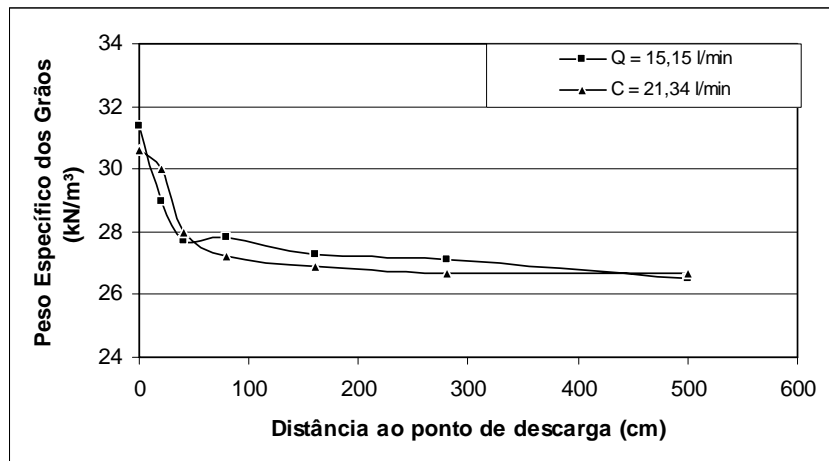


Figura 5.55 - Variação do  $\gamma_s$  para uma C próxima a 25% e Q entre 15,15 e 21,34 l/min.

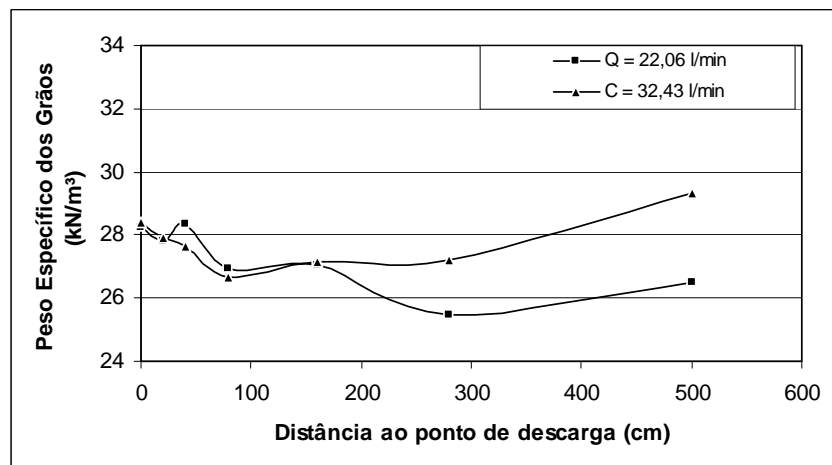


Figura 5.56 - Variação do  $\gamma_s$  para uma C próxima a 30% e Q entre 22,06 e 32,43 l/min.

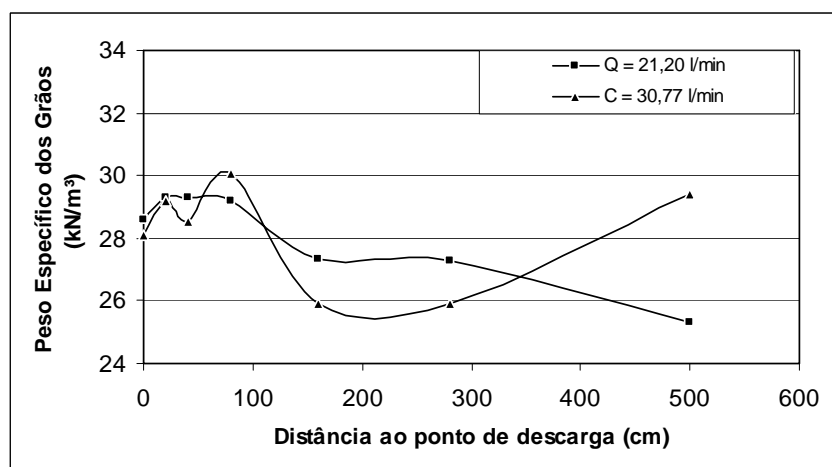


Figura 5.57 - Variação do  $\gamma_s$  para uma C próxima a 35% e Q entre 21,20 e 30,77 l/min.

Tomando-se por base os valores ilustrados nas figuras anteriores, infere-se que ocorre uma redução brusca nos valores obtidos para o peso específico dos grãos durante os primeiros 50 cm distante do ponto de descarga.. A partir deste ponto, é possível observar que o  $\gamma_s$  tende a estabilizar até o término da praia, apresentando um valor médio próximo a 27 kN/m<sup>3</sup>. As Figuras 5.58 a 5.61 ressaltam esta tendência. Com base nestes resultados, percebe-se que as partículas mais densas e de menor volume tendem a se depositar no trecho inicial da praia.

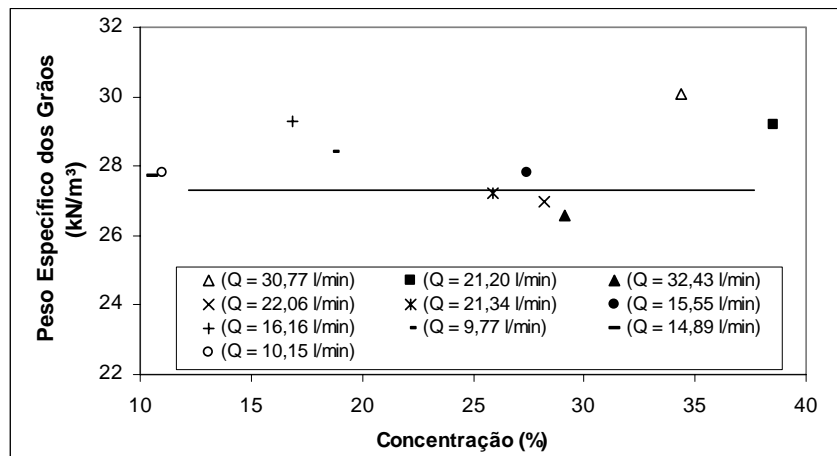


Figura 5.58 - Variação do  $\gamma_s$  com a concentração a 0,80 m do ponto de lançamento.

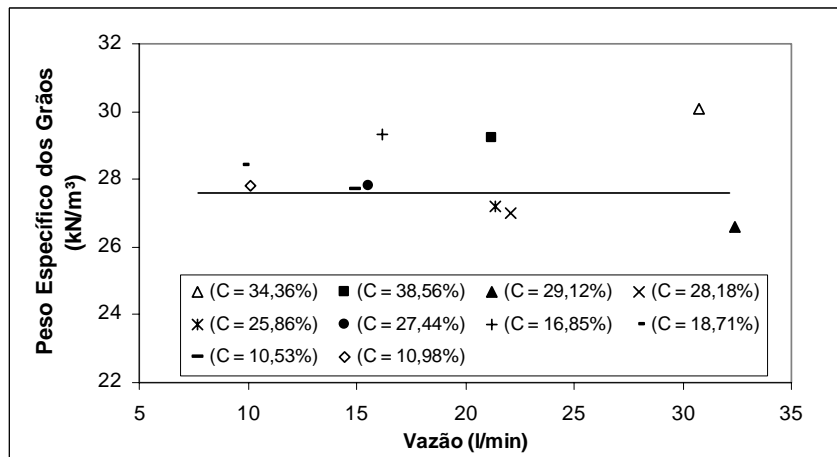


Figura 5.59 - Variação do  $\gamma_s$  com a vazão a 0,80 m do ponto de lançamento.

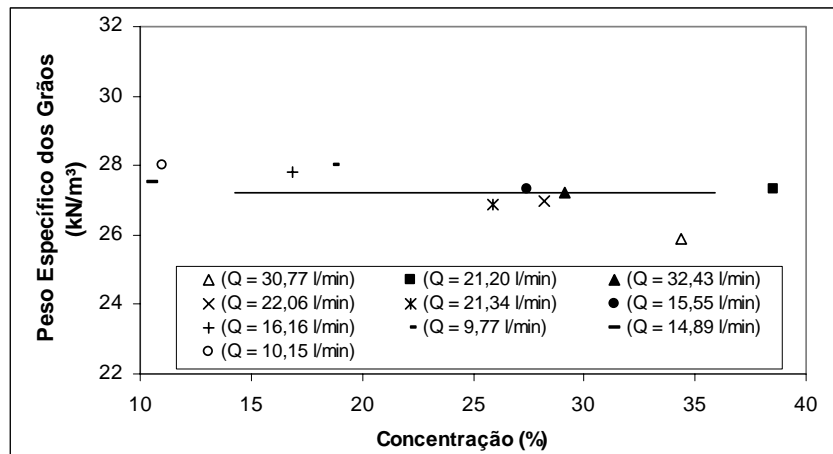


Figura 5.60 - Variação do  $\gamma_s$  com a concentração a 1,60 m do ponto de lançamento.

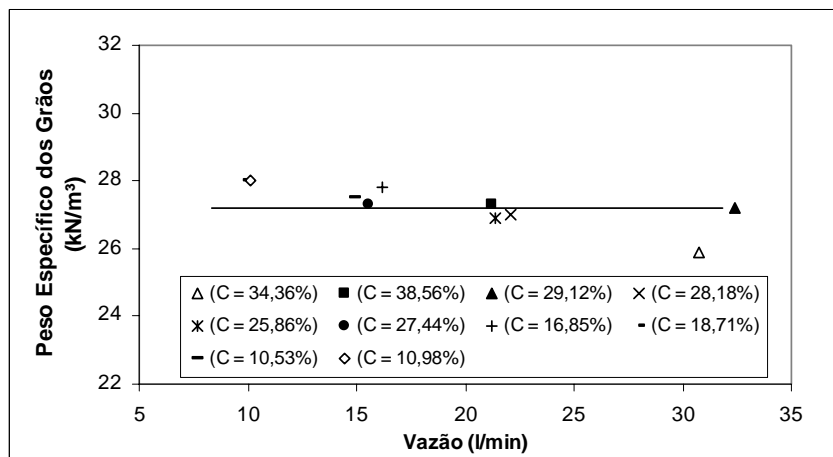


Figura 5.61 - Variação do  $\gamma_s$  com a vazão a 1,60 m do ponto de lançamento.

No ponto de descarga, pode-se observar que à medida que a concentração e a vazão aumentam, o  $\gamma_s$  tende a possuir valores menores, conforme ilustrado nas Figuras 5.62 e 5.63. Este fato revela a influência dos parâmetros de descarga na distribuição das partículas, principalmente na porção inicial do depósito. Após uma determinada distância este regime inicial de fluxo apresenta um menor efeito.



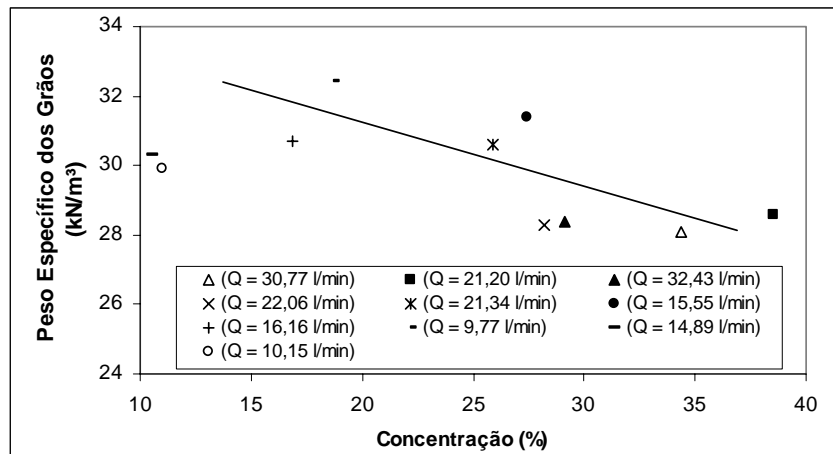


Figura 5.62 - Variação do  $\gamma_s$  com a concentração no ponto inicial de lançamento.

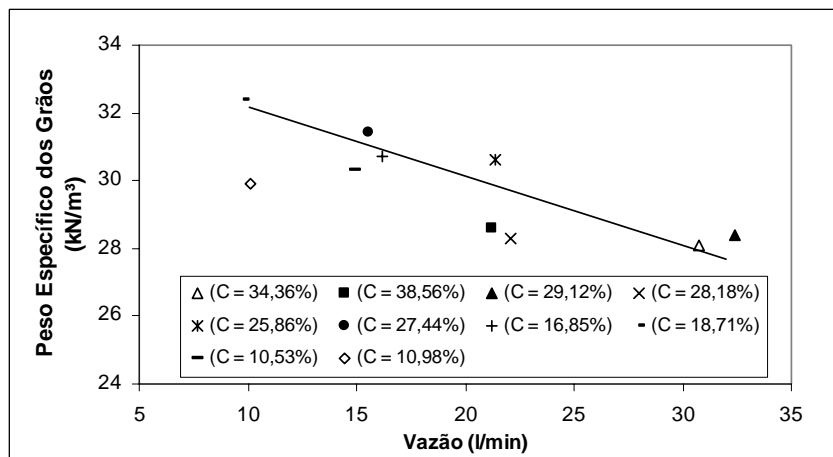


Figura 5.63 - Variação do  $\gamma_s$  com a vazão no ponto inicial de lançamento.

## 5.5. PESO ESPECÍFICO SECO

Considerando que o conhecimento do peso específico seco constitui um parâmetro extremamente importante para a avaliação do comportamento geotécnico dos aterros hidráulicos, haja vista que a partir dele torna-se possível a obtenção de outros parâmetros relevantes como o índice de vazios, porosidade, dentre outros. A Tabela 5.5 apresenta os valores obtidos para este índice físico em diferentes pontos do depósito, para cada uma das simulações realizadas no ESDH. As Figuras 5.64 a 5.72 apresentam a variação do peso específico seco em função das vazões e concentrações adotadas para este trabalho.

Tabela 5.5 - Peso específico seco em diferentes pontos do depósito.

Distância (m)	Peso Específico Seco (kN/m <sup>3</sup> )									
	C10Q10	C10Q15	C15Q10	C15Q15	C25Q15	C25Q20	C30Q20	C30Q30	C35Q20	C35Q30
0,0	16,00	15,20	15,40	16,50	16,40	16,20	14,82	15,49	15,82	15,53
0,1	15,80	15,50	15,20	15,40	16,50	15,60	15,46	15,54	15,69	15,30
0,2	14,80	15,40	15,00	16,00	16,30	15,70	16,01	15,68	14,92	15,17
0,3	14,70	14,80	14,00	15,20	15,80	15,10	15,49	15,25	14,81	15,54
0,4	14,20	14,50	14,20	15,00	15,50	14,60	15,80	15,60	15,11	15,32
0,5	14,30	14,60	14,00	14,90	14,70	14,70	14,40	14,60	14,32	14,03
0,6	14,40	14,40	13,90	15,40	14,50	14,60	14,84	15,60	14,47	14,71
0,8	14,90	14,50	13,90	15,20	13,90	14,70	14,29	15,58	14,13	13,12
1,0	15,10	14,90	13,70	15,30	14,20	14,60	14,78	14,49	14,59	13,84
1,2	14,00	15,70	14,20	15,10	14,40	14,90	14,85	14,42	15,09	14,47
1,4	16,50	14,20	13,90	15,10	15,10	14,70	14,29	15,45	14,99	14,33
1,6	15,90	15,10	13,50	14,90	14,50	14,80	15,56	15,18	14,38	14,14
1,8	14,20	14,40	13,90	15,20	15,00	14,40	15,90	14,18	15,07	14,57
2,0	15,20	13,70	13,70	15,90	14,40	14,50	15,81	14,05	14,74	13,29
2,2	16,20	17,50	12,80	15,60	13,20	14,70	17,21	13,71	-	-
2,4	16,80	15,50	14,20	16,10	14,10	15,10	14,37	-	-	-
2,6	17,20	-	16,10	17,50	13,80	14,90	16,62	-	-	-

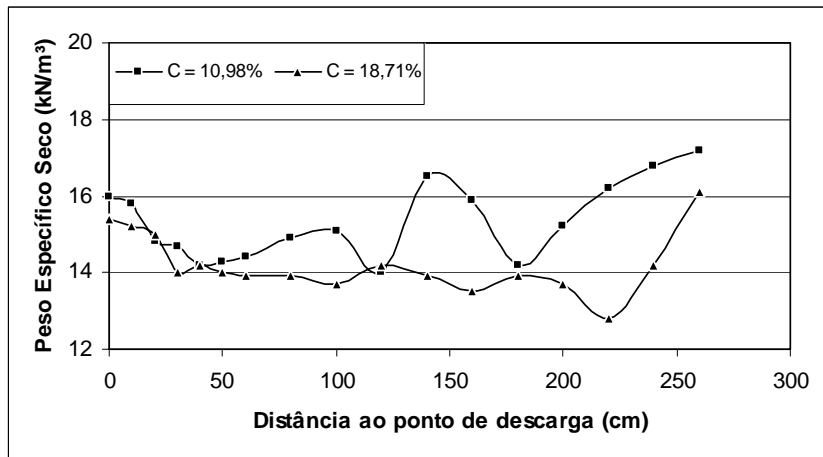


Figura 5.64 - Variação do  $\gamma_d$  para uma Q próxima a 10 l/min e C entre 10,98 e 18,71%.

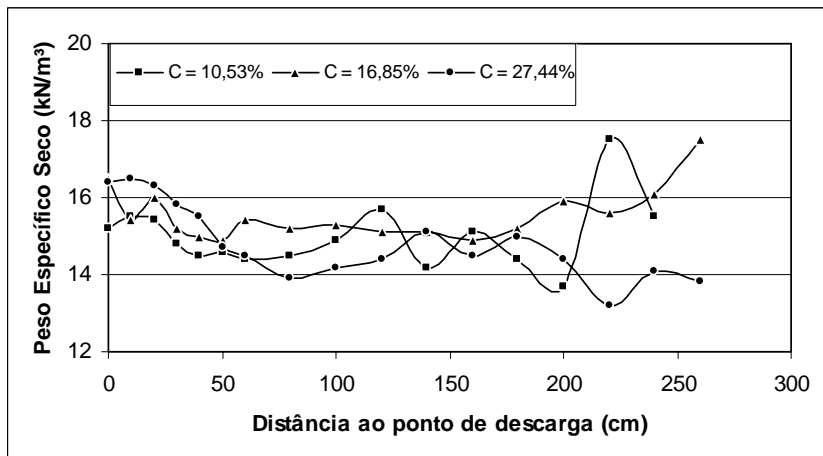


Figura 5.65 - Variação do  $\gamma_d$  para uma Q próxima a 15 l/min e C entre 10,53 e 27,44%.

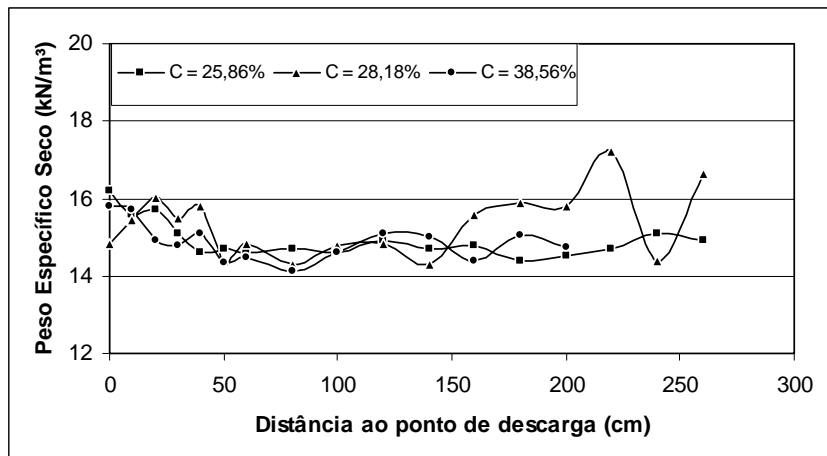


Figura 5.66 - Variação do  $\gamma_d$  para uma Q próxima a 20 l/min e C entre 25,96 e 38,56%.

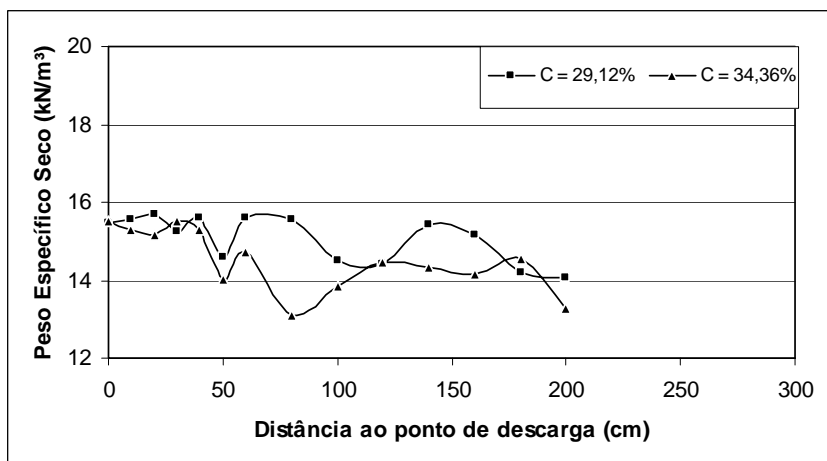


Figura 5.67 - Variação do  $\gamma_d$  para uma Q próxima a 30 l/min e C entre 29,12 e 34,36%.

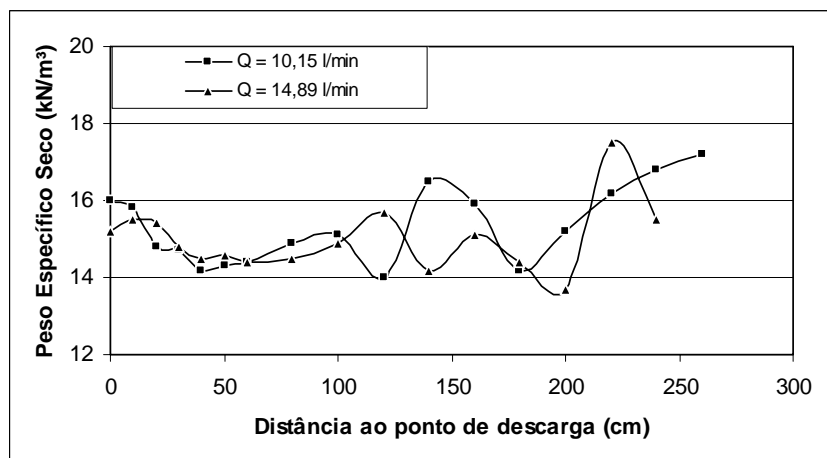


Figura 5.68 - Variação do  $\gamma_d$  para uma C próxima a 10% e Q entre 10,15 e 14,89 l/min.

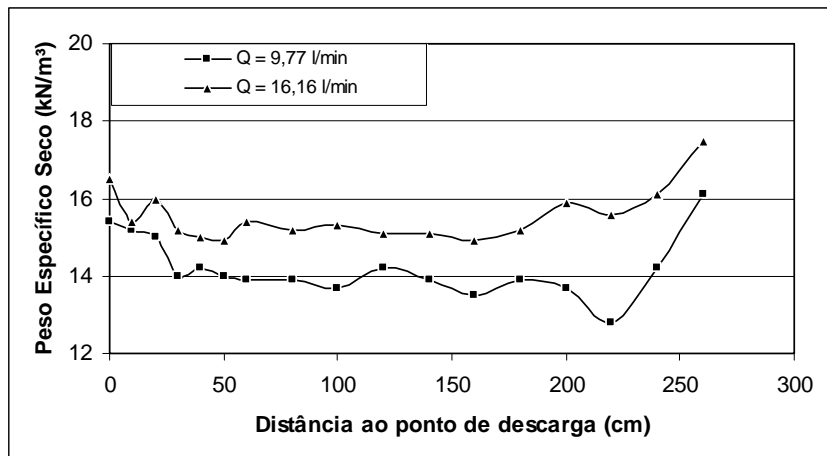


Figura 5.69 - Variação do  $\gamma_d$  para uma C próxima a 15% e Q entre 9,77 e 16,16 l/min.

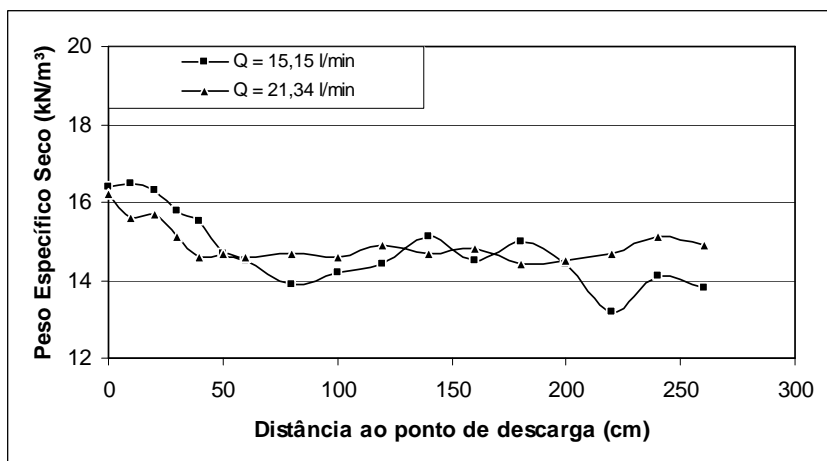


Figura 5.70 - Variação do  $\gamma_d$  para uma C próxima a 25% e Q entre 15,15 e 21,34 l/min.

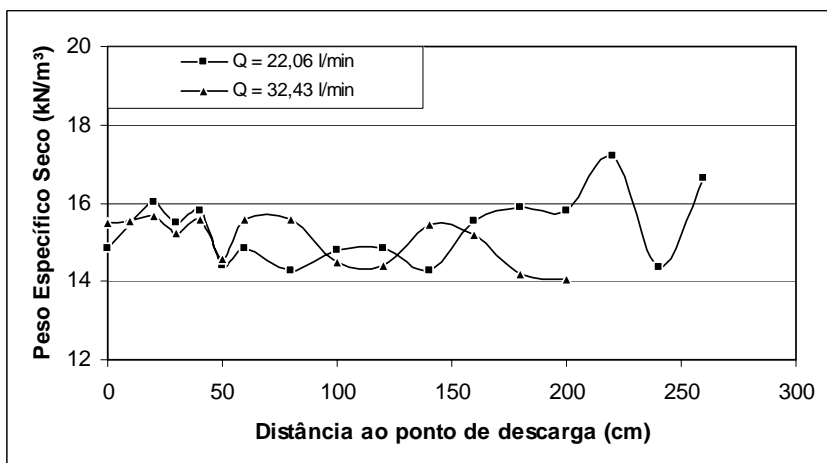


Figura 5.71 - Variação do  $\gamma_d$  para uma C próxima a 30% e Q entre 22,06 e 32,43 l/min.

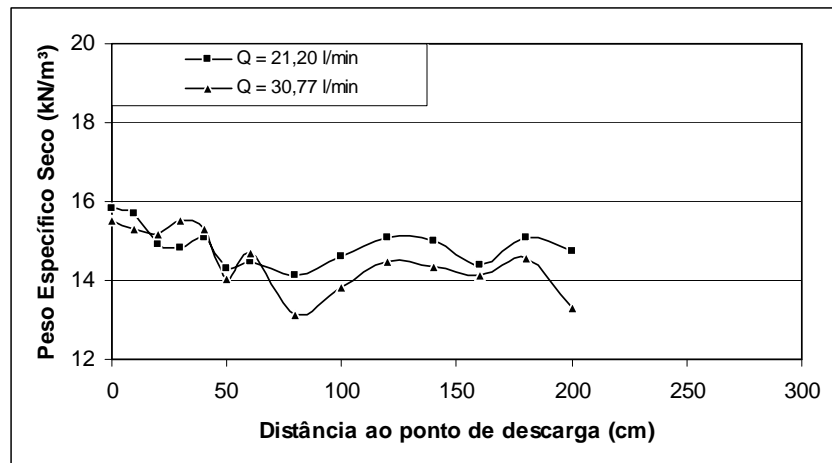


Figura 5.72 - Variação do  $\gamma_d$  para uma C próxima a 35% e Q entre 21,20 e 30,77 l/min.

Analisando as figuras relativas a variação do peso específico seco, percebe-se que ocorre um decréscimo nos seus valores para os primeiros 50 cm, com relação ao ponto de descarga. Pode-se, ainda, observar que estes valores tendem a estabilizar após os 50 cm iniciais até cerca de 200 cm. Por outro lado, a partir deste ponto nota-se alguns picos até o término das praias. Estes valores discrepantes poderiam estar associados às dificuldades encontradas durante a fase de obtenção das amostras, na região próxima ao término da praia, devido a uma grande quantidade de água ainda presente e a baixa espessura da praia nesta região.

Em um contexto geral e diferentemente dos outros parâmetros analisados anteriormente, o peso específico seco tendeu a permanecer constante com o aumento da concentração e com o aumento da vazão, mesmo na porção inicial do depósito. As Figuras 5.73 a 5.78 evidenciam esta tendência. Entretanto, o comportamento apresentado pelo peso específico seco está intimamente ligado ao processo de segregação hidráulica ocorrido durante a realização dos ensaios. As pequenas diferenças no valor do peso específico em cada ponto amostrado na praia permitem inferir que os grãos mais densos e de menor volume se acomodam na região próxima ao ponto de descarga. Por outro lado, num segundo estágio, ocorre uma transição entre os diversos tipos de grãos, de modo que os menos densos e de maior volume acabam se depositando ao longo da praia. Contudo, estas variações dentro do arranjo global do depósito pouco influenciaram na variação do  $\gamma_d$  para o rejeito estudado.

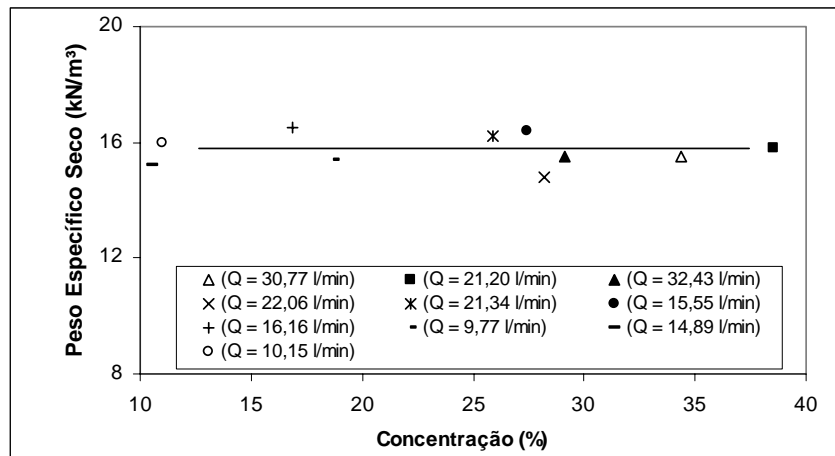


Figura 5.73 - Variação do  $\gamma_d$  com a concentração no ponto inicial de lançamento.

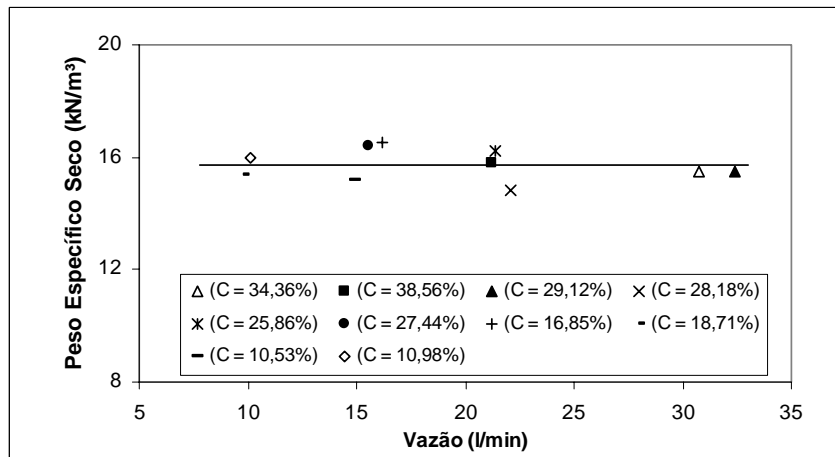


Figura 5.74 - Variação do  $\gamma_d$  com a vazão no ponto inicial de lançamento.

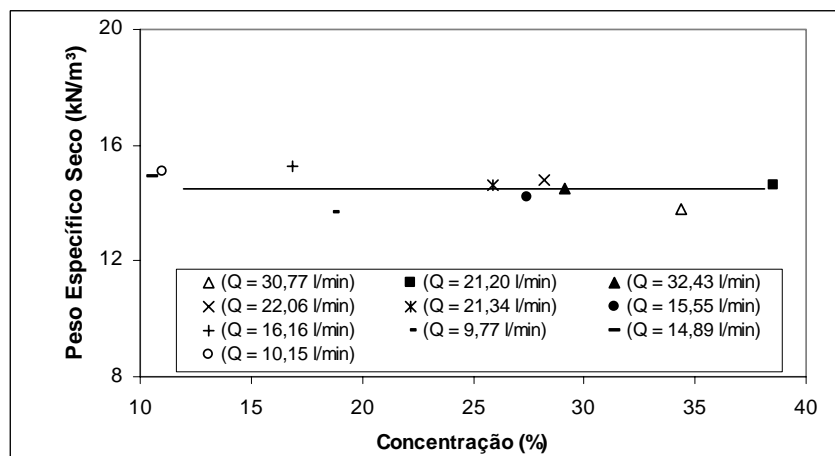


Figura 5.75 - Variação do  $\gamma_d$  com a concentração a 1,00 m do ponto de lançamento.

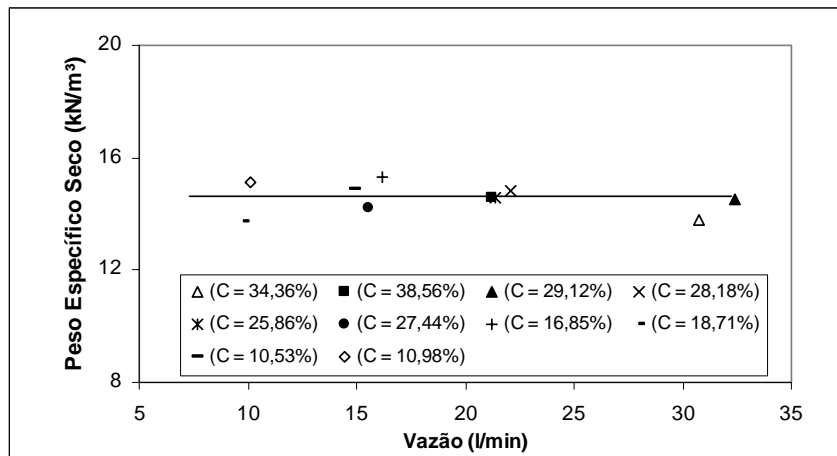


Figura 5.76 - Variação do  $\gamma_d$  com a vazão a 1,00 m do ponto de lançamento.

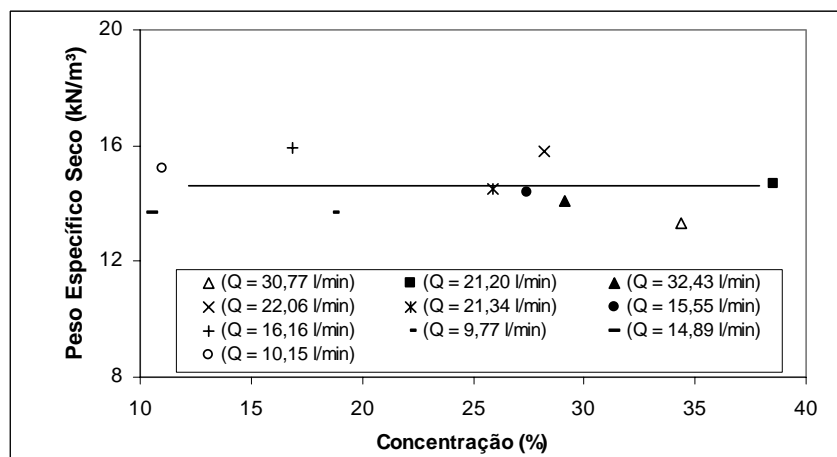


Figura 5.77 - Variação do  $\gamma_d$  com a concentração a 2,00 m do ponto de lançamento.

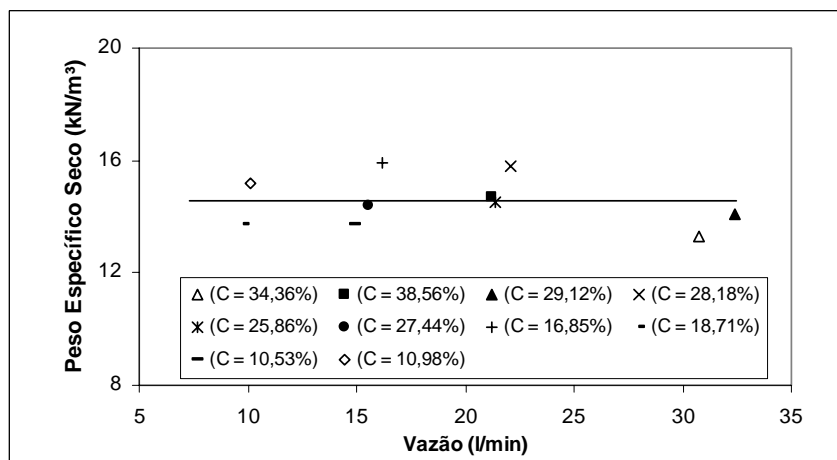


Figura 5.78 - Variação do  $\gamma_d$  com a vazão a 2,00 m do ponto de lançamento.

## 5.6. ÍNDICE DE VAZIOS

O índice de vazios consiste de uma propriedade geotécnica extremamente importante pois representa a densidade do depósito. A importância no conhecimento dos seus valores, ao longo de um depósito, deve-se ao fato de um melhor entendimento de como as partículas encontram-se distribuídas no espaço, além de permitir uma melhor modelagem sob as condições impostas pelo meio. A Tabela 5.6 apresenta os valores obtidos para os índices de vazios quantificados ao longo dos ensaios no ESDH. As Figuras 5.79 a 5.87 ilustram a variação dos índices de vazios em função das diversas vazões e concentrações adotadas.

Tabela 5.6 - Índice de vazios em diferentes pontos do depósito.

Distância (m)	Índice de Vazios									
	C10Q10	C10Q15	C15Q10	C15Q15	C25Q15	C25Q20	C30Q20	C30Q30	C35Q20	C35Q30
0,0	0,9	0,94	1,14	0,99	0,9	0,95	0,94	0,87	0,84	0,85
0,2	0,88	0,91	0,92	0,89	0,78	0,92	0,77	0,81	1,00	0,96
0,4	0,99	0,92	0,95	0,94	0,79	0,93	0,83	0,81	0,98	0,90
0,8	0,85	0,92	1,05	0,94	1	0,88	0,92	0,74	1,11	1,34
1,6	0,75	0,83	1,12	0,89	0,9	0,84	0,77	0,83	0,94	0,87
2,5	0,57	0,75	0,87	0,64	0,82	0,82	-	-	-	-

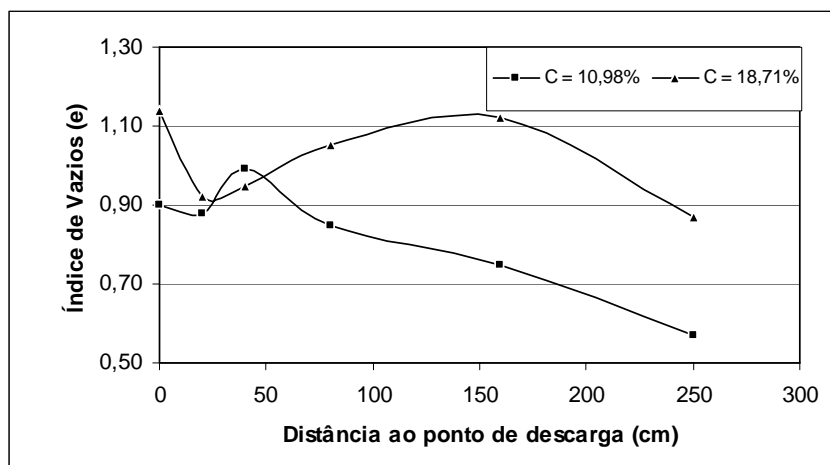


Figura 5.79 - Variação do Índice de Vazios para  $Q = 10$  l/min e C entre 10,98 e 18,71%.



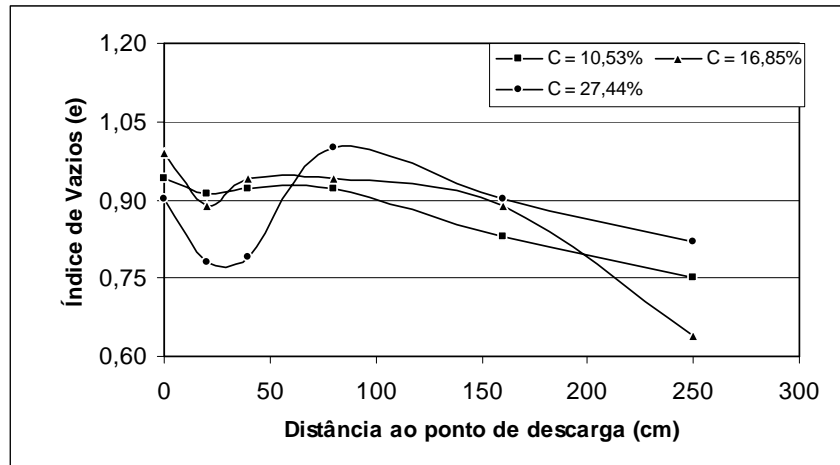


Figura 5.80 - Variação do Índice de Vazios para  $Q = 15$  l/min e C entre 10,53 e 27,44%.

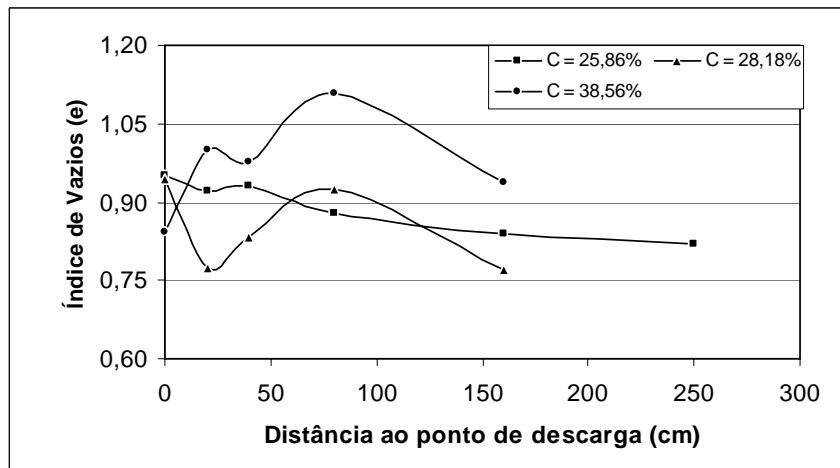


Figura 5.81 - Variação do Índice de Vazios para  $Q = 20$  l/min e C entre 25,86 e 38,56%.

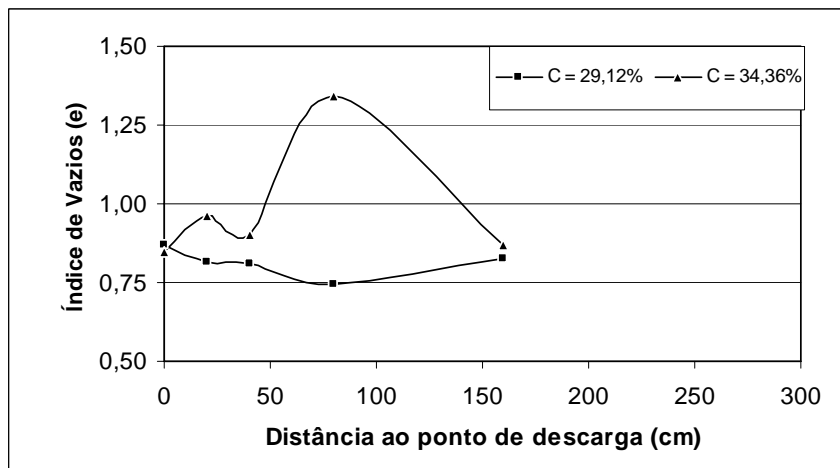


Figura 5.82 - Variação do Índice de Vazios para  $Q = 30$  l/min e C entre 29,12 e 34,36%.

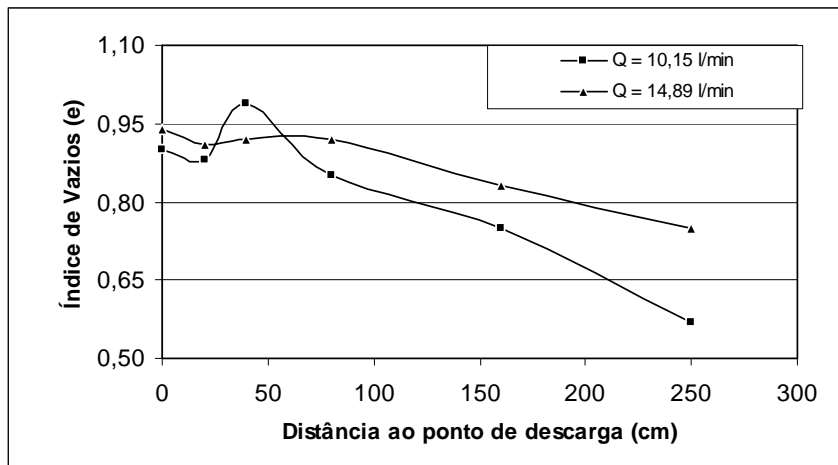


Figura 5.83 - Variação do Índice de Vazios para  $C = 10\%$  e  $Q$  entre 10,15 e 14,89 l/min.

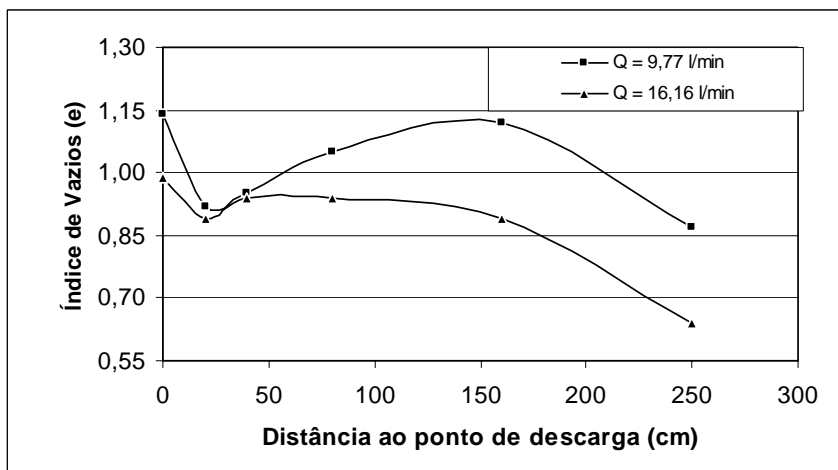


Figura 5.84 - Variação do Índice de Vazios para  $C = 15\%$  e  $Q$  entre 9,77 e 16,16 l/min.

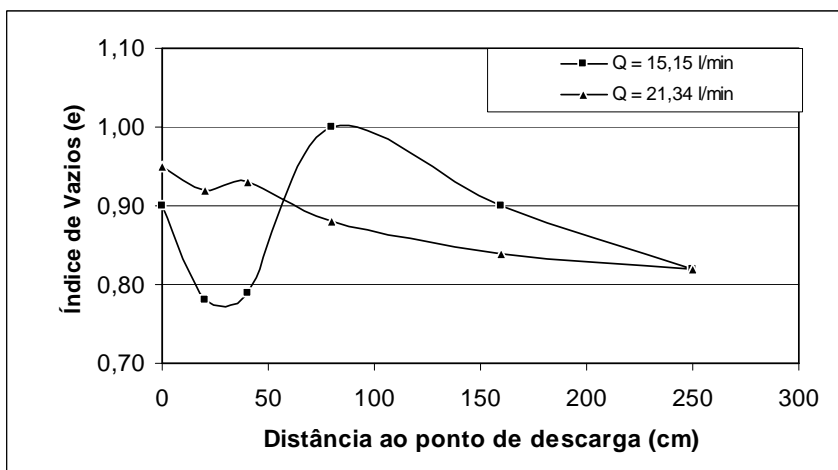


Figura 5.85 - Variação do Índice de Vazios para  $C = 25\%$  e  $Q$  entre 15,15 e 21,34 l/min.

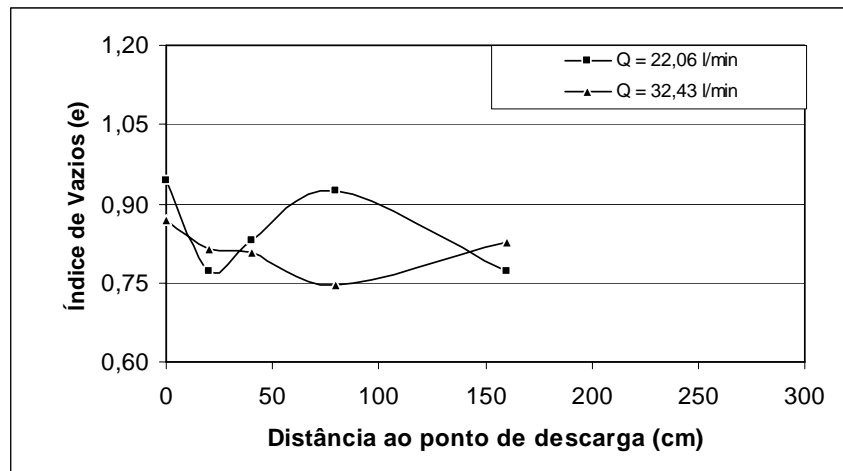


Figura 5.86 - Variação do Índice de Vazios para  $C = 30\%$  e  $Q$  entre 22,06 e 32,43 l/min.

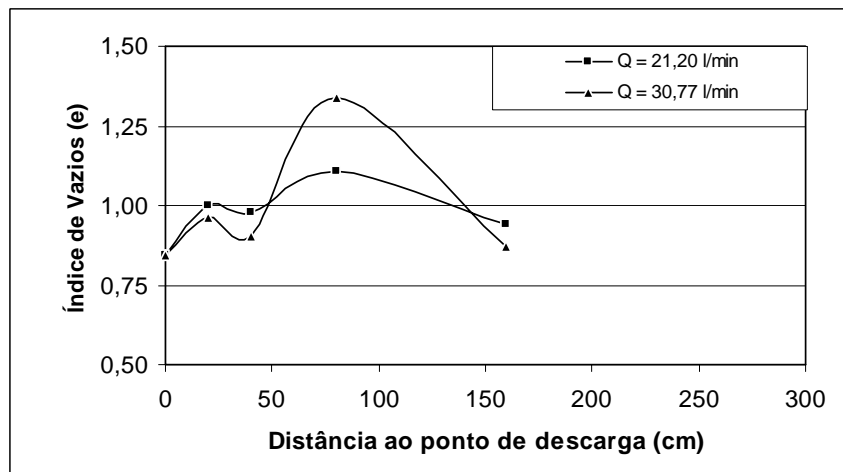


Figura 5.87 - Variação do Índice de Vazios para  $C = 35\%$  e  $Q$  entre 21,20 e 30,77 l/min.

Analisando os gráficos anteriores é possível observar que até os 30 cm iniciais ao ponto de descarga, ocorre uma redução nos valores obtidos para os índices de vazios. Esta redução pode ser caracterizada pelo maior efeito do processo de deposição. Após os 30 cm iniciais ocorre uma grande oscilação nos valores obtidos, de modo que não é possível mencionar nenhuma tendência de comportamento, para o resto da praia. Como justificativa para essas oscilações destaca-se a segregação hidráulica, variação de umidade ao longo da praia e como mencionado anteriormente efeitos do processo de obtenção das amostras.

## 5.7. PERMEABILIDADE

O conhecimento da permeabilidade consiste de elemento essencial no entendimento do comportamento hidráulico de um dado depósito. A partir dos valores relativos a este parâmetro é possível a realização de uma melhor análise das características de resistência e deformabilidade destes depósitos. Conforme mencionado no Capítulo 4, para obtenção dos valores de permeabilidade utilizou-se a relação apresentada por HVORSLEV (1949), citado por LAMBE e WHITMAN (1994). A Tabela 5.7 apresenta os valores obtidos para as diversas permeabilidades medidas ao longo das simulações. Em seguida, as Figuras 5.88 a 5.96 reproduzem a variação da permeabilidade em relação às vazões e concentrações ensaiadas.

Tabela 5.7 - Permeabilidade em diferentes pontos do depósito.

Distância (m)	Permeabilidade (cm/s)									
	C10Q10	C10Q15	C15Q10	C15Q15	C25Q15	C25Q20	C30Q20	C30Q30	C35Q20	C35Q30
0,05	0,039	0,030	0,052	0,050	0,050	0,040	0,030	0,066	0,046	0,070
0,35	0,038	0,030	0,050	0,055	0,082	0,030	0,051	0,052	0,071	0,050
0,65	0,038	0,033	0,062	0,030	0,038	0,032	0,036	0,033	0,075	0,051
0,95	0,050	0,052	0,058	0,032	0,034	0,042	0,042	0,032	0,050	0,083
1,25	0,037	0,032	0,044	0,050	0,036	0,038	0,037	0,031	0,046	0,044
1,55	-	0,038	0,056	-	0,040	0,038	0,023	0,023	0,040	0,015

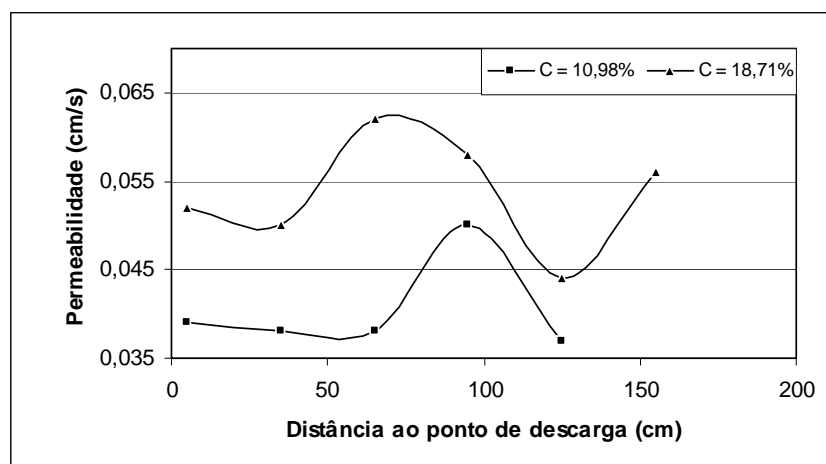


Figura 5.88 - Variação da  $k$  para uma  $Q$  próxima a 10 l/min e  $C$  entre 10,98 e 18,71%.

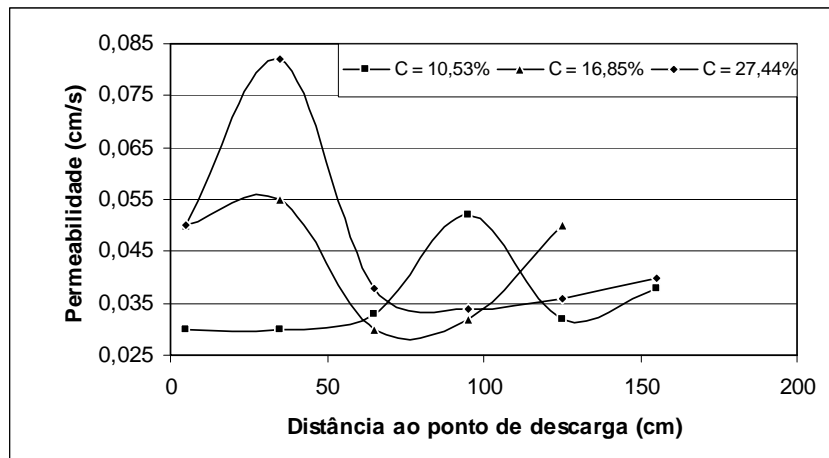


Figura 5.89 - Variação da k para uma Q próxima a 15 l/min e C entre 10,53 e 27,44%.

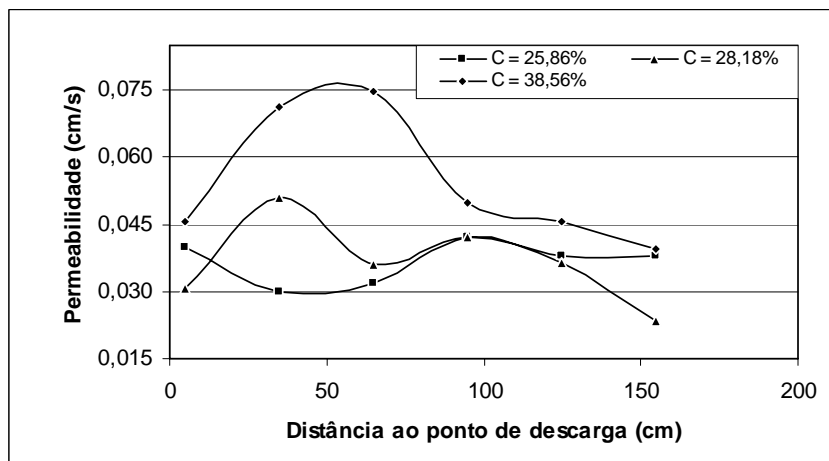


Figura 5.90 - Variação da k para uma Q próxima a 20 l/min e C entre 25,86 e 38,56%.

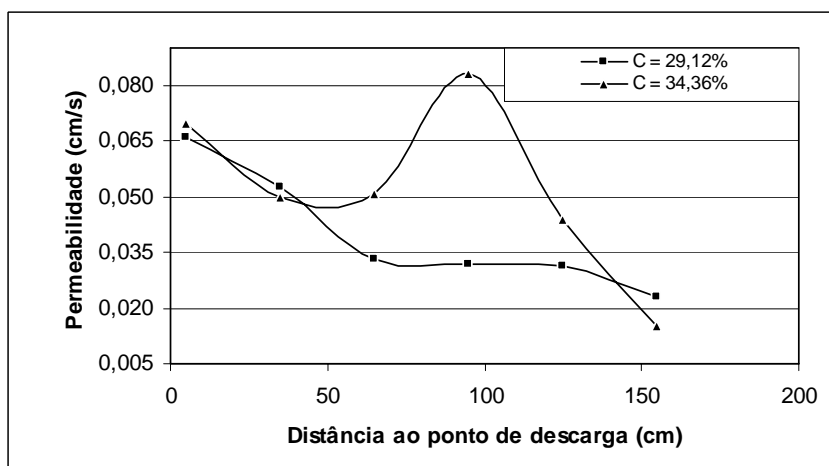


Figura 5.91 - Variação da k para uma Q próxima a 30 l/min e C entre 29,12 e 34,36%.

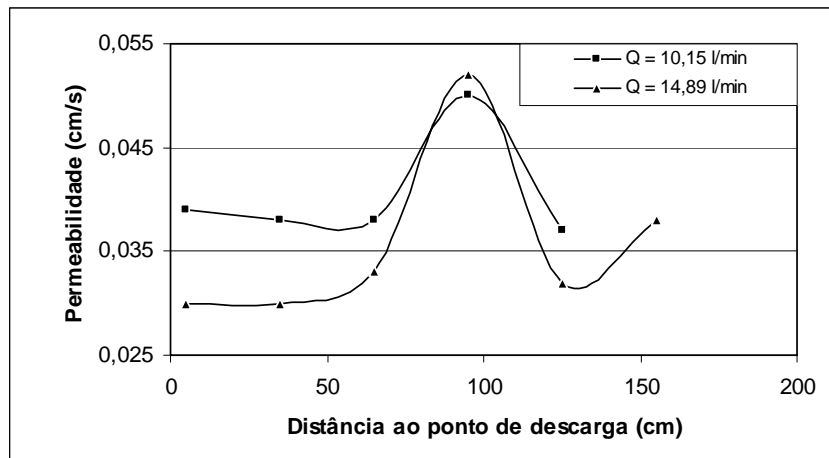


Figura 5.92 - Variação da k para uma C próxima a 10% e Q entre 10,15 e 14,89 l/min.

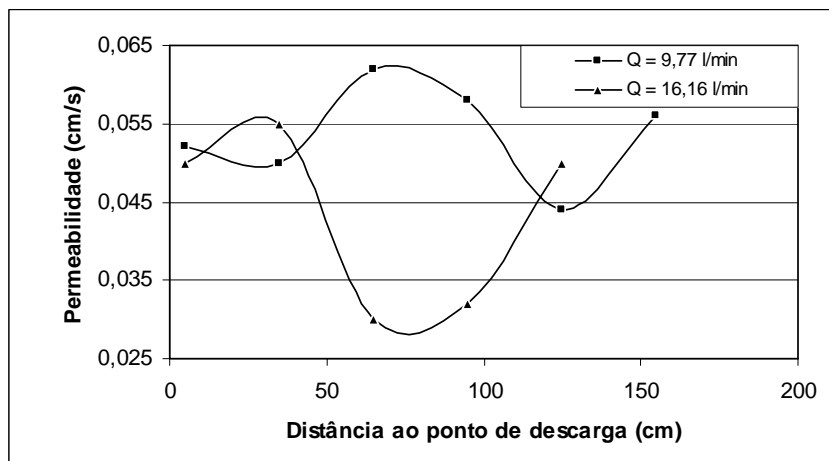


Figura 5.93 - Variação da k para uma C próxima a 15% e Q entre 9,77 e 16,16 l/min.

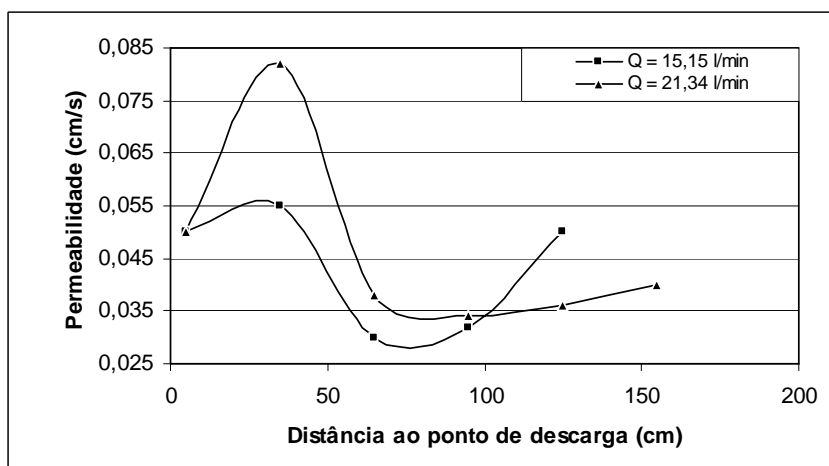


Figura 5.94 - Variação da k para uma C próxima a 25% e Q entre 15,15 e 21,34 l/min.

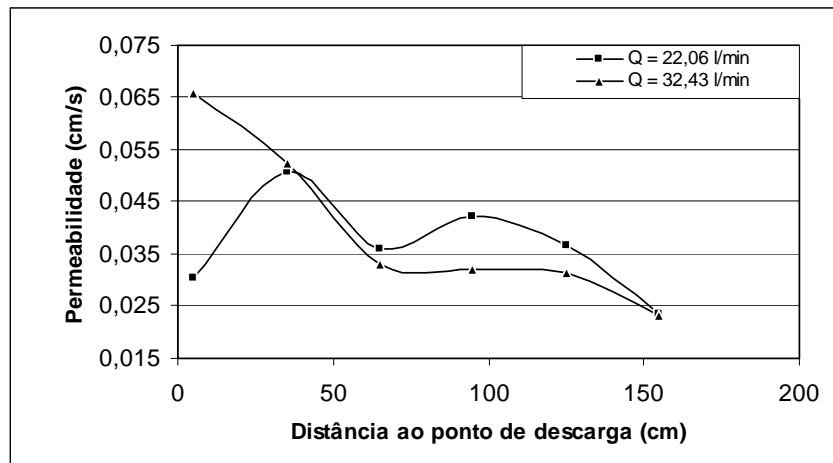


Figura 5.95 - Variação da k para uma C próxima a 30% e Q entre 22,06 e 32,43 l/min.

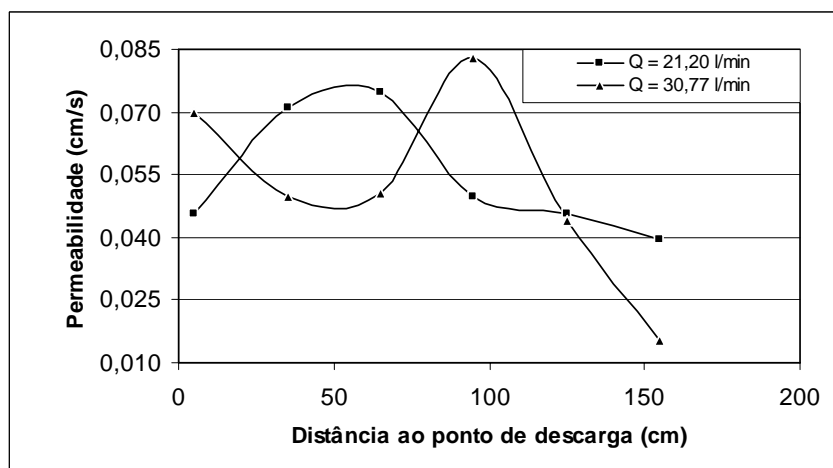


Figura 5.96 - Variação da k para uma C próxima a 35% e Q entre 21,20 e 30,77 l/min.

Observa-se que para as figuras apresentadas, a permeabilidade obtida ao longo do depósito evidencia alguns picos à medida que se afasta do ponto de descarga. Esses picos, na maioria dos casos, coincidem com as regiões situadas entre os 50 cm e 100 cm distante do ponto de descarga. As regiões em que a permeabilidade atinge o seu valor máximo normalmente coincidem com as porções do depósito em que ocorre uma maior concentração de partículas grossas. Contudo, o comportamento apresentado pela permeabilidade não se revelou um tendência clara, de modo que não foi possível estabelecer correlações deste parâmetro com a vazão e a concentração.

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A seguir, serão apresentadas as principais conclusões extraídas na presente dissertação, bem como serão feitas algumas sugestões para trabalhos futuros.

#### 6.1. CONCLUSÕES

Ao término do trabalho tornou-se possível verificar que o processo de deposição hidráulica encontra-se diretamente relacionado aos parâmetros de vazão e concentração. Foi verificado também que esses parâmetros promovem a velocidade e a forma do fluxo no interior do canal. Pode-se observar que para situações envolvendo altas concentrações e baixas vazões acabam por gerar uma deposição não homogênea, de forma que o material sólido mais denso tende a depositar bem próximo ao ponto de descarga. Por outro lado, vazões elevadas e concentrações baixas geram velocidades de arrastes muito grandes e fazem com que ocorra uma distribuição granulométrica atípica. Além disso, para esse tipo de situação tem-se a formação de grandes lagoas de decantação, o que requerem sistemas de drenagens extremamente eficientes na hora de projetar barragens de rejeito por meio desta técnica de disposição e a necessidade de grandes áreas em campo para o acondicionamento e distribuição da água a ser armazenada.

Foi possível observar que em determinados momentos, no processo de deposição hidráulica, ocorreram os surgimentos de erosões regressivas ao longo da praia a ser formada, de forma que este fenômeno acabou modificando sistematicamente a disposição das partículas sólidas no interior do canal e influenciou de sobremaneira nos resultados obtidos para o presente trabalho. Verificou-se que a incidência maior deste fenômeno estava associada a baixas vazões.

A potencialidade apresentada pelo Equipamento de Simulação e Deposição Hidráulica (ESDH) constitui um dispositivo poderoso no estudo do comportamento das barragens de rejeito segundo a técnica de aterros hidráulicos. As simulações realizadas em sua estrutura permitem avaliar



qualitativamente as variáveis que influenciam no comportamento das praias formadas e proporciona um maior entendimento dos fenômenos físicos envolvidos.

Infere-se das simulações realizadas que a geometria das praias apresenta uma disposição levemente convexa e as variáveis que controlam o processo (vazão e concentração) geram uma influência direta na formação dos depósitos. A inclinação das praias tende a ser mais acentuada com o aumento da concentração e menos elevada com o aumento da vazão. Contudo, mudanças nessas variáveis durante o processo de deposição, fazem com que haja uma reestruturação em toda a geometria, de forma que a mesma procure um certo equilíbrio para a nova concepção atribuída. Modificações impostas nos sistemas de drenagens podem gerar uma reorganização do depósito, variando desde a configuração da crista até o término da praia formada inicialmente. Esta situação é capaz de provocar mudanças consideráveis ao longo de todo o perfil.

Das análises obtidas para a segregação granulométrica infere-se que, de uma forma geral, a região próxima ao ponto de descarga apresenta partículas mais densas, de modo que sua deposição ocorre mais rapidamente. Ressalta-se, porém, que apesar das partículas possuírem o peso específico dos grãos maiores, neste ponto, o seu diâmetro é menor quando comparados aos das partículas situadas a uma distância maior. Fica evidente que na região central das praias, ocorre a deposição de partículas com maior volume e, conseqüentemente, maior diâmetro. Porém, nessa seção intermediária, os valores do peso específico dos grãos são menores que os encontrados no trecho inicial da praia.

O peso específico dos grãos evidencia a importância do processo de segregação hidráulica, afetando diretamente a geometria do depósito e outras propriedades geotécnicas importantes. Contudo, observou-se que após os primeiros 50 cm seu valor tende a se estabilizar até o término da praia.

Os resultados obtidos para o peso específico seco no decorrer do perfil, permitem afirmar que a sua quantificação está condicionada à natureza do processo de deposição, a composição química do rejeito e a granulometria do material ensaiado. No caso do rejeito estudado seu valor se manteve praticamente constante ao longo de todo o depósito.

Das análises feitas sobre os índices de vazios medidos para os ensaios realizados, pode-se concluir que as limitações apresentadas dificultaram o estabelecimento de uma tendência no comportamento dos depósitos formados. Entretanto, para o trecho inicial das praias, aproximadamente até os 30 cm iniciais, ficou evidenciado um decréscimo significativo nos valores encontrados para o índice de vazios, de modo que neste ponto as partículas encontram-se mais próximas umas das outras e como consequência o maciço apresenta-se mais denso e resistente. Desse ponto em diante não se pode estabelecer uma tendência de comportamento precisa.

Uma outra propriedade importante que foi avaliada foi à permeabilidade, onde as estimativas encontradas apontaram que as partes iniciais e finais das praias apresentam permeabilidades mais baixas e correlaciona-se com partículas de diâmetros menores. Por outro lado, as regiões intermediárias apresentaram picos na permeabilidade com valores mais elevados e os materiais pertencentes a estes trechos se revelam com diâmetro dos grãos maiores. Entretanto, não foi possível obter uma correlação entre a permeabilidade e as variáveis de descarga.

Por fim, com base em todo o contexto mencionado anteriormente, pode-se concluir que o estudo das propriedades intrínsecas ao rejeito de ouro e a forma como ele é depositado, segundo a técnica de aterros hidráulica, é de fundamental importância para o domínio do conhecimento tecnológico para se projetar estruturas constituídas desse material e fazendo-se uso dessa forma de disposição. O monitoramento do comportamento apresentado pelos depósitos hidráulicos, durante e após a etapa de deposição, permite a projeção de estruturas mais seguras, confiáveis e econômicas. Com isso, para um embasamento qualitativo, as simulações realizadas no ESDH permitiram uma visão de como se processa toda a deposição hidráulica destes resíduos minerais.

## **6.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

Como forma de continuar esta linha de pesquisa, sugere-se que sejam feitas novas baterias de simulações no ESDH, para outros tipos de rejeitos de ouro, de forma a obter um banco de dados maior e, com isso, possibilitar à realização de um maior número de análises a respeito do comportamento deste material. Como resultado destas análises, será possível um melhor entendimento do comportamento apresentado por estes depósitos formado pela técnica de aterros

hidráulicos. Além disso, os resultados destas simulações podem fornecer uma maior clareza na tendência no comportamento destes depósitos com base nas variáveis de deposição hidráulica.

Do ponto de vista operacional, sugere-se uma melhor adaptação no controlador de vazão do ESDH, de forma que as simulações ocorram com uma vazão constante durante todo o ensaio.

Uma outra sugestão, diz respeito a um redimensionamento no sistema de drenagem do canal, de forma que o mesmo opere com vazões mais elevadas. Na atual conjuntura, trabalhar com vazões elevadas implica em grande acúmulo de água no interior do canal, comprometendo o processo de formação dos depósitos.

Avaliar melhor as metodologias de coleta de amostras, principalmente realizadas na região final do depósito de modo a diminuir os efeitos na obtenção dos valores da densidade do depósito.

Por último, de posse de um banco de dados mais consolidado, sugere-se a obtenção dos parâmetros geotécnicos em campo, a fim de fazer uma correlação em termos de efeito escala.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- ABNT (1984). Solo – Análise Granulométrica – NBR 7181/84. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 13 p.
- ABNT (1984). Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica. NBR 6508. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 8 p.
- ABNT (1993). Elaboração e apresentação de projeto de disposição de rejeitos de beneficiamento, em barramento, em mineração. NBR130028. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 10 p.
- ARCHIBALD, J.F. (2000). Beneficial Impacts of Paste Tailings on Environmental Hazard Mitigation and Engineering Performance Improvement. Department of Mining Engineering, Canadá.
- ASSIS, A.P. & ESPÓSITO, T.J. (1995). Construção de Barragens de Rejeito sob uma Visão Geotécnica. III Simpósio Sobre Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, REGEO'95, ABMS/ABGE/CBGB, Ouro Preto, MG, pp. 259-274.
- ALMEIDA, F.F.M. (1979). Observações sobre o Pré-cambriano da Região Central de Goiás. In: 21º Congresso Brasileiro de Geologia. Curitiba. SBG, pp. 19-22.
- ALMEIDA, F.F.M., & HASUI, Y., (1984). O Pré-cambriano do Brasil. Edgard Blucher, São Paulo, 378 p.
- CAMPOS NETO, M.C. (1979). Contribution à l'étude des Brasilides: Lithostratigraphic et Structure de Groupes Canastra, Paranoá et Bambuí dans l'ouest, nord ouest de l'état de Minas Gerais (Bresil). These Univ. Pierre et Marie Curie-Paris VI, Dept. Geotectonique, Paris, France, 155 p.
- CHAVES, A.P. (1996). Teoria e Prática do Tratamento de Minérios, Signus, Volumes 1 e 2, São Paulo, SP, 256 p.
- CHAVES, A.P. & PERES, A.E.C. (1999). Teoria e Prática do Tratamento de Minério: Britagem, Peneiramento e Moagem, Signus, Volume 3, São Paulo, SP, 164p.
- CHAMMAS, R. (1989). Notas de Aula do Curso de Barragens de Contenção de Rejeitos. Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, UFOP, Ouro Preto, MG.
- DARLENE, M.A., (1978). Síntese sobre a Estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: 30º Congresso Brasileiro de Geologia. Recife. SBG, vol. 2, pp. 597-610.

- ESPÓSITO, T. J. (2000). Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeitos construídas por aterro hidráulico. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 359 p.
- ESPÓSITO, T.J. & ASSIS, A.P. (1999). Método probalístico acoplado ao método observacional aplicado a barragem de rejeito. 4º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, REGEO'99, ABMS. São Jose dos Campos, Brasil, pp. 187-194.
- ESPÓSITO, T.J., ASSIS, A.P. & RIBEIRO, L.F.M., (1997). Una Alternativa de Control de la Calidad de la Construcción de Represas para Escoria. 4º Congresso Chileno de Ingeniería Geotécnica, Chile, pp. 455-468.
- FERREIRA, R.C.; PERES, J.E.E. & MONTEIRO, L. B. (1980). Geotechnical characteristics of hydraulic fill scale models. 13<sup>th</sup> Brazilian National Conference of Large Dams, CBGB, Rio de Janeiro, RJ, pp. 496-516.
- FREITAS - SILVA, F.H., (1996). Metalogênese do Depósito do Morro do Ouro. Paracatu - MG. Universidade de Brasília. Tese de Doutorado.
- FREITAS - SILVA, F.H., DARDENE, M.A., MARQUES, F.B., (1996). Metalogênese do Depósito do Morro do Ouro. Paracatu - MG. 39º Congresso Brasileiro de Geologia. Salvador. SBG, 7: 207-209.
- FUCK, R.A., PIMENTEL, M.M., SILVA, L.J.H.D., (1994). Compartimentação Tectônica da Porção Oriental da Província de Tocantins. 38º Congresso Brasileiro de Geologia. Santa Catarina. pp. 215-216.
- GARGA, V.K. e TRANCOSO, J.H. (1990). Desing and evaluation of behaviour of tailings dams. General Report. IX Pan-American Conference on Soil Mechamics and Geotechnical Engineering, ISSMGE, Viña del Mar, Chile, pp. 2027-2093.
- GUMIERE, A.G., BUENO, B.S., LIMA, D.C e MINETTE, E. (1995). Estudo do Potencial de Liquefação de Rejeitos de Mineração sob Carga Estática. III Simpósio Sobre Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, REGEO'95, ABMS/ABGE/CBGB, Ouro Preto, MG, pp. 59-68.
- HERNANDEZ, H.M. (2005). Utilização do Equipamento de simulação de Deposição Hidráulica (ESDH) para a Caracterização Geomecânica de Rejeitos Aplicada a Barragens de Aterro Hidráulico. Exame de Qualificação de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 50 p.
- HERNANDEZ, H.M. (2007). Ensaio de Simulação de Deposição Hidráulica (ESDH) para a Caracterização de Rejeitos Aplicada a Barragens de Aterro Hidráulico. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 187 p.

- HVORSLEV, M.J., 1949. Time Lag in the Observation of Ground-Water Levels and Pressures. U.S. Army Water-Ways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
- HSU, S.J.C. (1988). Review of practice in hydraulic fill constructions. Hydraulic Fill Structures, ASCE, Geotech Special Publications n°21, D.J.A. Van Zyl & S.G. Vick (eds), pp. 884-901.
- KLOHN, E.J. (1981). The development of current tailing dam design and construction methods. Design and Construction of Tailings Dam. D. Wilson (ed.), Colorado School of Mines Golden, USA.
- KUPPER, A.M.A.G. (1991). Design of hydraulic fill. PhD Thesis, Dept of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Canada, 525p.
- KUPPER, A.M.A.G.; MORGENSTERN, N.R. & SEGO, D.C. (1992a). Laboratory test to study hydraulic fill. Canadian Geotechnical Journal, 29 (3): 405-417.
- KUPPER, A.M.A.G.; MORGENSTERN, N.R. & SEGO, D.C. (1992b). Comparisons between various flumes test used for hydraulic-fill studies. Canadian Geotechnical Journal, 29 (3): 418-425.
- LAMBE, T.M. & WHITMAN, R.V. (1994). Mecânica de Suelos. Limusa, México, 582 p.
- LINS, F.F. Flotação de Minérios de Ouro. 2000. Relatório Interno CETEM.
- LINS, F.F. Concentração Gravítica. In: Tratamento de Minérios. Ed. por A.B.Luz, M.V.Possa e S.L.Almeida. 2ª edição. 1998. CETEM. Rio de Janeiro.
- LOPES, M.C. (2000). Deposição hidráulica de rejeitos granulares e a influência nos seus parâmetros de resistência. Tese de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 158 p.
- MARINI, O.J., FUCK, R.A., DARDENE, M.A., DANNI, J.C.M., (1984). Província do Tocantins, Setores Central e Sudeste. Edgard Blucker. São Paulo. pp. 205-264.
- MARQUES, F.B., BATELOCHI, M.A., MOLLER, J.C.C., (1996). Geologia, Mineralização e Lavra do Morro do Ouro. Paracatu - MG. In: 39º Congresso Brasileiro de Geologia. Salvador. SBG, vol. 7, pp. 203-206.
- MARSDEN, J., e HOUSE, I. The Chemistry of Gold Extraction. 1992, Ellis Horwood. New York.
- MMA - Ministério do Meio Ambiente (1997). Diretrizes Ambientais para o Setor Mineral. Brasília, DF, 125p.

- MORETTI, M.R. & CRUZ, P.T. (1996). Aterros hidráulicos e sua aplicação na construção de barragens. 100 barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção e projeto, P.T. Cruz, (ed.), Oficina de Letras, São Paulo, SP, pp. 556-591.
- RIBEIRO, L.F.M (2000). Simulação física do processo de formação dos aterros hidráulicos aplicados a barragens de rejeitos. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 235 p.
- RIBEIRO, L.F.M & ASSIS, A.P. (1999). Experimental simulation of the hydraulic deposition process in tailings dams. XI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. ISSMGE, Foz do Iguaçu, Brazil, 3: 1113-1120.
- SCHUYLER, J.D. (1906). Recent Practice of hydraulic fill dam. Transaction ASCE, 1043: 195-277.
- VICK, S.G. (1983). Planning, Design, and Analysis of Tailing Dams. John Wiley e Sons, New York, USA, 369 p.
- ZINNI, A., FORLIM, R., ANDREAZZA, P., SOUZA, A., (1988). Depósito de Ouro do Morro do Ouro. Paracatu, Minas Gerais. In: Principais Depósitos Minerais do Brasil, Brasília, DNPM, CVRD. 3: 479-489.

**CURVAS GRANULOMÉTRICAS OBTIDAS NAS SIMULAÇÕES REALIZADAS NO EQUIPAMENTO DE SIMULAÇÃO E DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA**

As Figuras A.1 a A.10 representam as curvas granulométricas obtidas para cada ensaio de simulação realizado no ESDH.



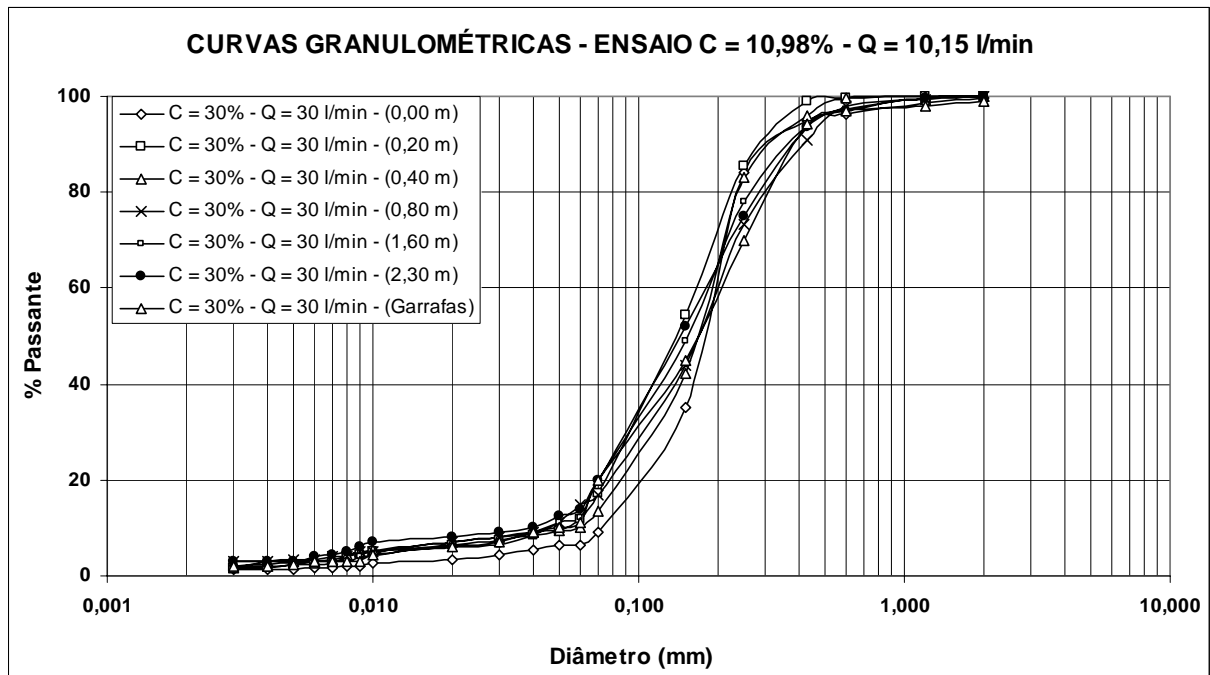


Figura A.1 - Curvas granulométricas dos pontos amostrados ao longo do depósito para o ensaio C10Q10.

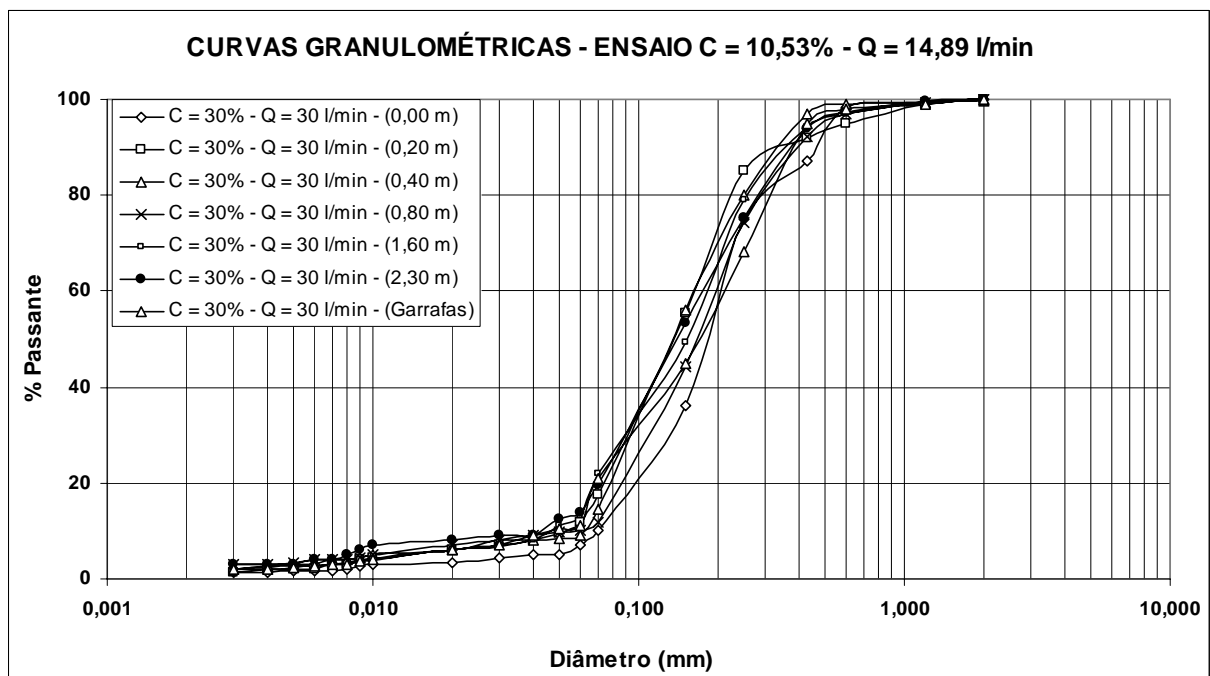


Figura A.2 - Curvas granulométricas dos pontos amostrados ao longo do depósito para o ensaio C10Q15.

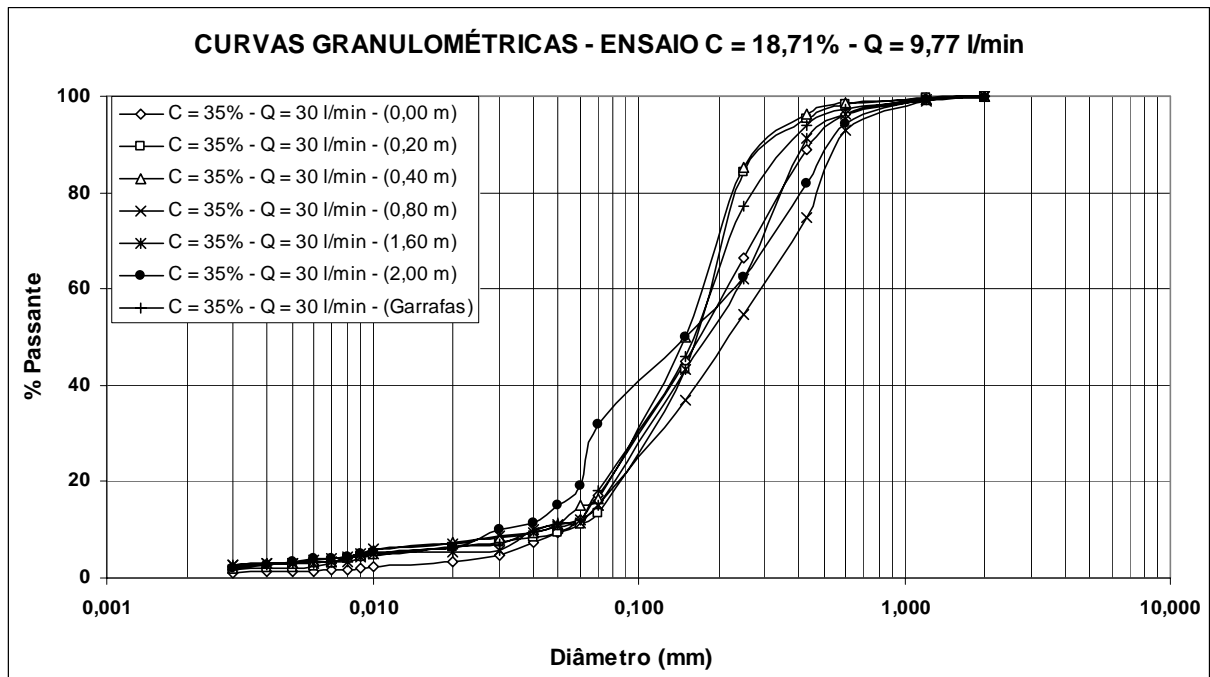


Figura A.3 - Curvas granulométricas dos pontos amostrados ao longo do depósito para o ensaio C15Q10.

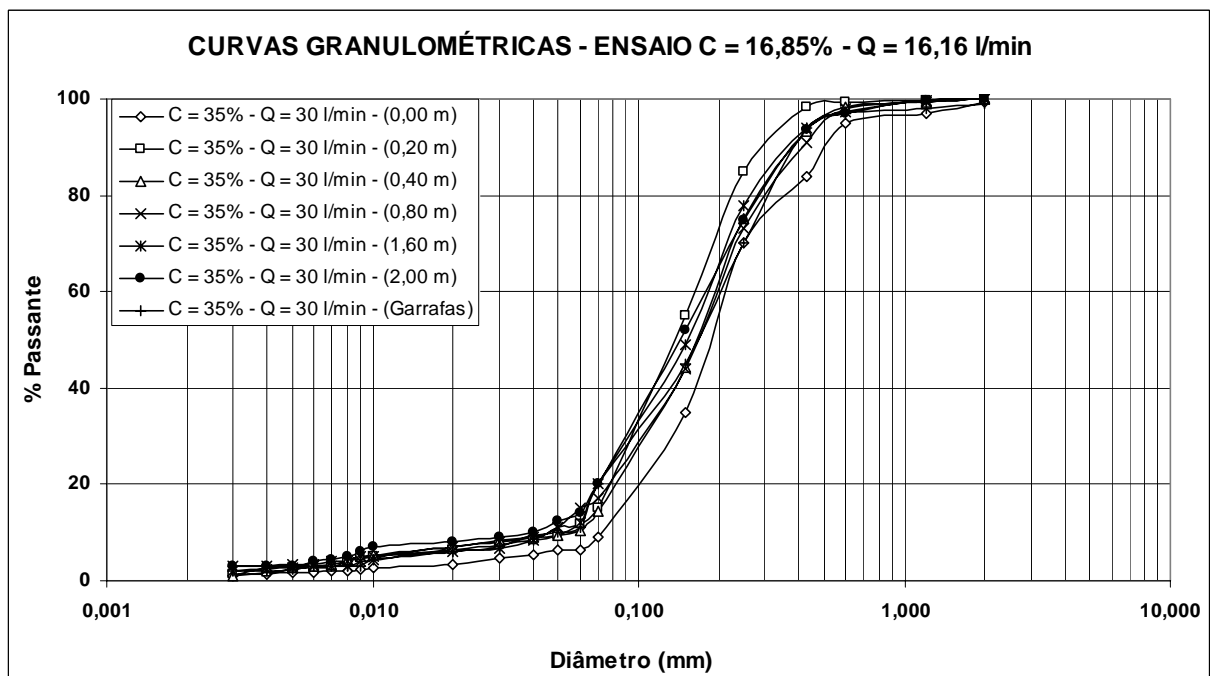


Figura A.4 - Curvas granulométricas dos pontos amostrados ao longo do depósito para o ensaio C15Q15.

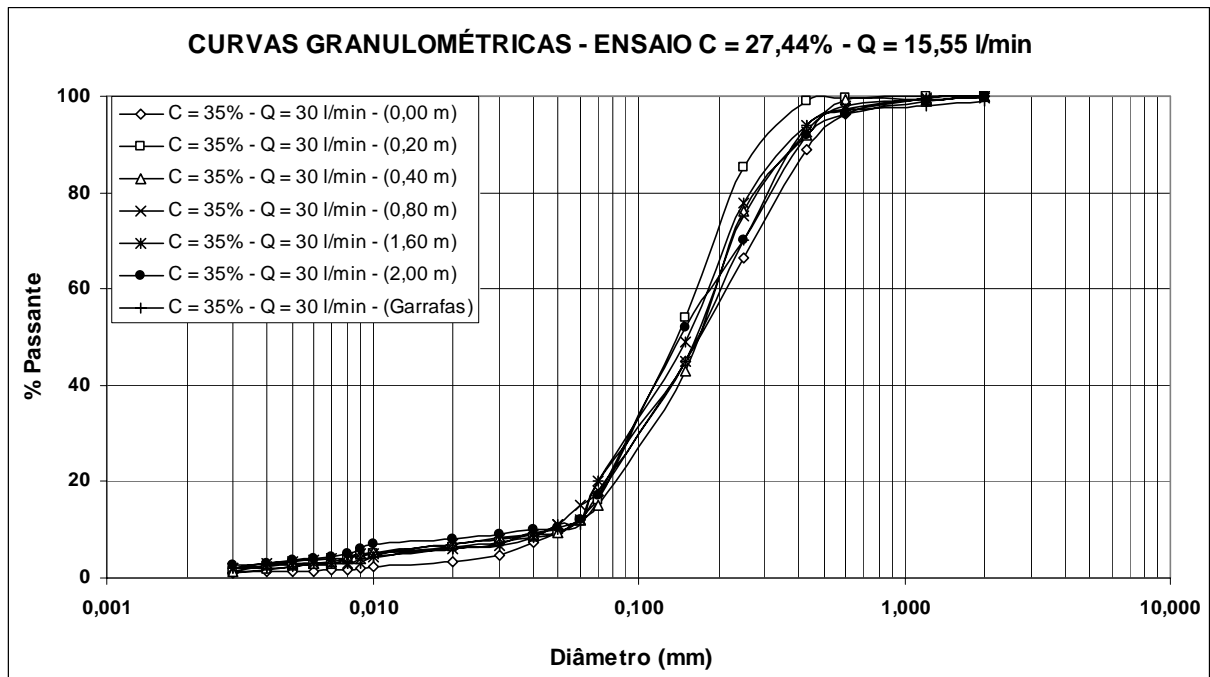


Figura A.5 - Curvas granulométricas dos pontos amostrados ao longo do depósito para o ensaio C25Q15.

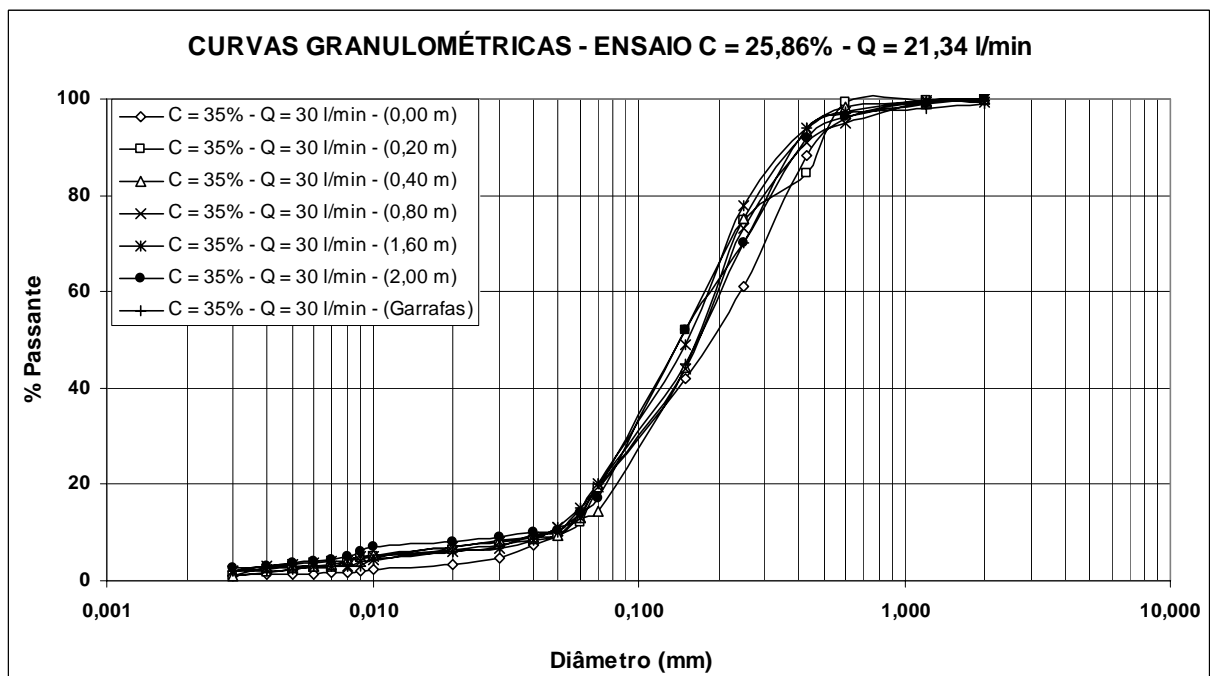


Figura A.6 - Curvas granulométricas dos pontos amostrados ao longo do depósito para o ensaio C25Q20.

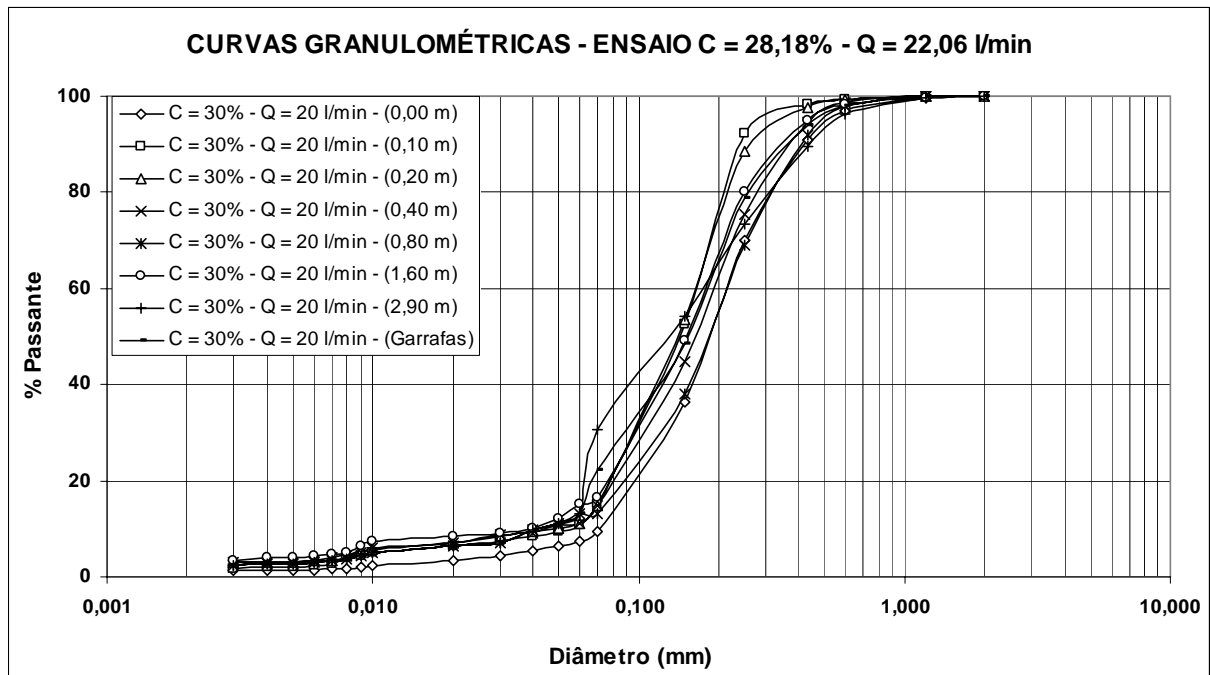


Figura A.7 - Curvas granulométricas dos pontos amostrados ao longo do depósito para o ensaio C30Q20.

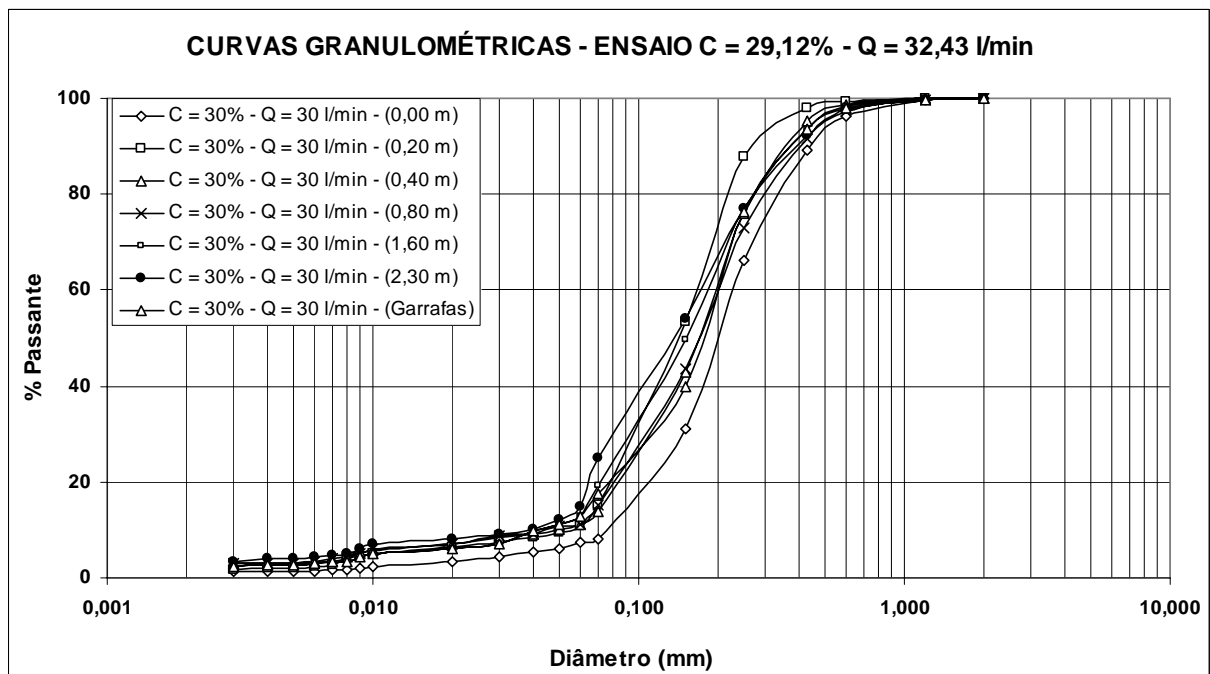


Figura A.8 - Curvas granulométricas dos pontos amostrados ao longo do depósito para o ensaio C30Q30.

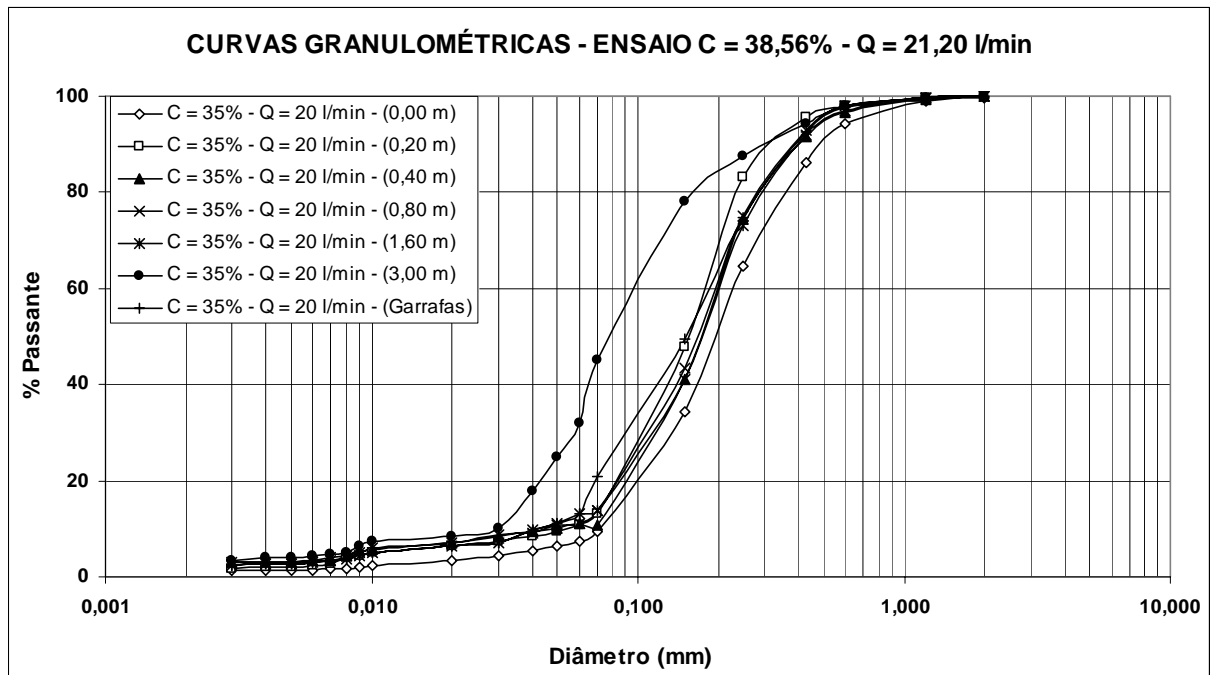


Figura A.9 - Curvas granulométricas dos pontos amostrados ao longo do depósito para o ensaio C35Q20.

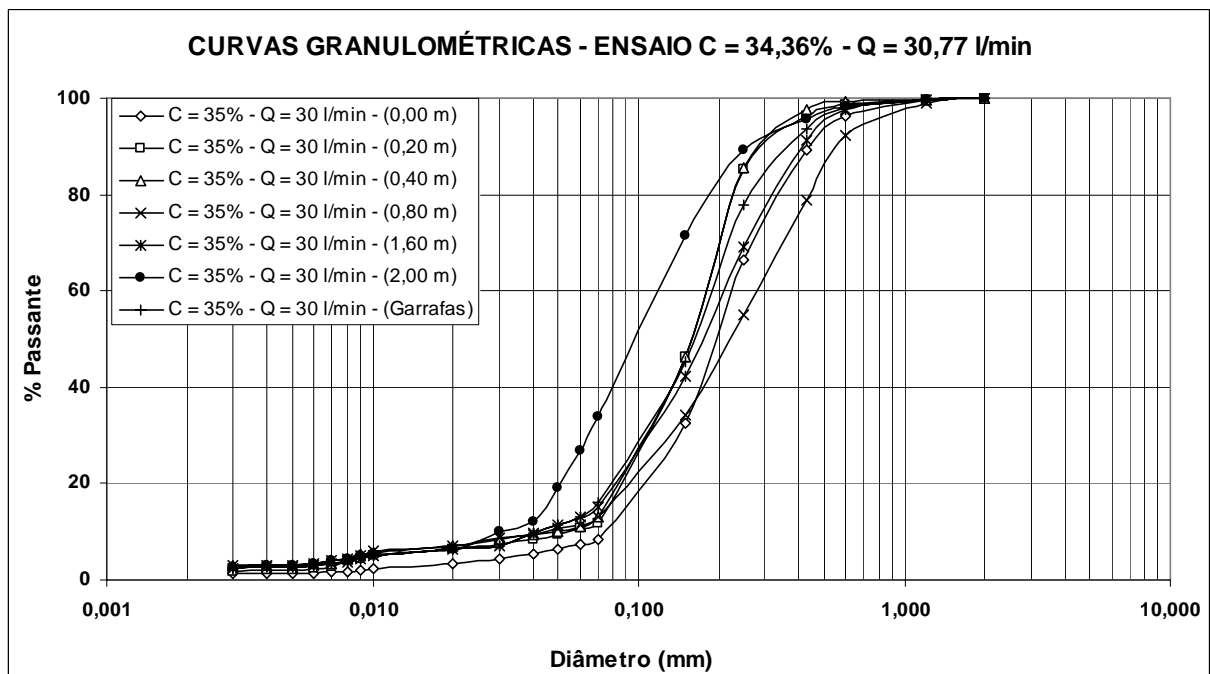


Figura A.10 - Curvas granulométricas dos pontos amostrados ao longo do depósito para o ensaio C35Q30.