

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

**ENSAIOS DE SIMULAÇÃO DE DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA (ESDH)**  
**PARA A CARACTERIZAÇÃO DE REJEITOS UTILIZADOS EM**  
**BARRAGENS DE ATERRO HIDRÁULICO**

**HECTOR MAURICIO OSÓRIO HERNANDEZ**

**ORIENTADOR: ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD**

**TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.TD-047/07**

**BRASÍLIA / DF, JUNHO DE 2007**

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

**ENSAIOS DE SIMULAÇÃO DE DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA (ESDH)  
PARA A CARACTERIZAÇÃO DE REJEITOS UTILIZADOS EM  
BARRAGENS DE ATERRO HIDRÁULICO**

**HECTOR MAURICIO OSORIO HERNANDEZ**

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

APROVADA POR:

---

ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, Ph.D. (UnB)  
(ORIENTADOR)

---

LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, D.Sc. (UnB)  
(CO-ORIENTADOR)

---

MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, Ph.D. (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)

---

PEDRO MURRIETA SANTOS NETO, D.Sc. (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)

---

ROMERO CÉSAR GOMES, D.Sc. (UFOP)  
(EXAMINADOR EXTERNO)

---

NEUSA MARIA BEZERRA MOTA, D.Sc. (UnB)  
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 06 DE JUNHO DE 2007.

## FICHA CATALOGRÁFICA

HERNANDEZ, HECTOR MAURICIO

Ensaio de Simulação de Deposição Hidráulica (ESDH) para a Caracterização de Rejeitos Utilizados em Barragens de Aterro Hidráulico [Distrito Federal] 2007 xxii, 186 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2007)

Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Rejeito de Mineração

2. Deposição Hidráulica

3. Resistividade Elétrica

4. Congelamento de Rejeito

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

HERNANDEZ, H.M.O. (2007). Ensaio de Simulação de Deposição Hidráulica (ESDH) para a Caracterização de Rejeitos Utilizados em Barragens de Aterro Hidráulico. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-047/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 186 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Hector Mauricio Osório Hernandez

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Ensaio de Simulação de Deposição Hidráulica (ESDH) para a Caracterização de Rejeitos Utilizados em Barragens de Aterro Hidráulico

GRAU / ANO: Doutor / 2007

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

---

**Hector Mauricio Osorio Hernandez**

Calle 41 No. 38B-51, Apto. 301

Medellín Colômbia

Fones: +57 4 216 80 62, +57 4 217 91 50

# DEDICATÓRIA

A todas las personas queridas que hicieron  
posible la conclusión de este trabajo  
Mama, Íris, Adriana, Paula  
Alejandra e Juan Camilo

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao programa de Pós-Graduação da Universidade de Brasília pelos conhecimentos adquiridos;

Ao CNPq que proporcionou o apoio financeiro durante os anos de estudo;

À Íris por sua incondicional companhia e carinho, e pelos valiosos aportes durante o desenvolvimento desta pesquisa;

À minha família, minha mãe, minhas irmãs, meus sobrinhos e meu cunhado pela compreensão e pelo carinho brindado durante minha ausência;

Aos professores André e Luís Fernando pelos seus apoios e orientação;

Um agradecimento especial para os meus colegas que compartilharam comigo alegrias e tristezas durante os anos de estudo.

Aos colegas e técnicos do laboratório de geotecnia da UnB que conhecem o verdadeiro valor do trabalho experimental.

# **ENSAIOS DE SIMULAÇÃO DE DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA (ESDH) PARA A CARACTERIZAÇÃO DE REJEITOS UTILIZADOS EM BARRAGENS DE ATERRO HIDRÁULICO**

## **RESUMO**

O compromisso social e ambiental da boa mineração exige o estudo e a compreensão dos diferentes materiais que fazem parte do ciclo de extração. O conhecimento do comportamento dos rejeitos produzidos pelo ato da mineração é tão importante quanto o estudo do minério ou do processo de exploração. A deposição dos rejeitos de mineração em estruturas seguras que permitam um adequado controle dos efluentes, assim como dos próprios rejeitos, é o melhor caminho para a redução dos impactos ambientais gerados pelas mineradoras. Esta deposição é geralmente realizada em estruturas denominadas barragens de rejeito e, na maioria dos casos, o transporte dos rejeitos até as barragens é realizado na forma de lamas ou polpas, que são misturas de rejeito com água, sendo que as lamas apresentam uma menor concentração de rejeito que as polpas. As lamas são transportadas com o emprego de tubulações e com a ajuda da gravidade ou, em alguns casos, por sistemas de bombeamento. Nesta pesquisa foi estudado, em modelo reduzido, como os lançamentos de lamas de três tipos de rejeitos de mineração se comportam ao serem conduzidos para a conformação de aterros hidráulicos. Para este propósito foram realizados ensaios no Equipamento de Simulação de Deposição Hidráulica (ESDH), montado pelas universidades de Brasília e Federal de Ouro Preto. Foram utilizados dois rejeitos de minério de ouro da mina Morro do Ouro, obtidos por diferentes processos, e um rejeito de minério de ferro, proveniente da mina de Morro Agudo. Para estes materiais foi estudada a influência das variáveis que definem a deposição hidráulica das lamas (vazão e concentração) na distribuição de parâmetros geotécnicos ao longo das praias de deposição. Para este fim, foram avaliados parâmetros como o peso específico, o índice de vazios, a permeabilidade e a granulometria. Foi também estudada a influência da vazão e da concentração da lama na variação da altura da crista das praias com o tempo durante a evolução dos ensaios de deposição. Dos ensaios de simulação de deposição hidráulica realizados, foi possível verificar como as mudanças na viscosidade da lama e alterações na vazão de descarga influenciam os parâmetros geotécnicos, a variação da altura da crista e a geometria final das praias. Paralelamente foi estudado o comportamento geotécnico dos depósitos de rejeito de minério de ferro, assim como a influência do processo de congelamento nas mudanças volumétricas de amostras deste rejeito.

# **HYDRAULIC DEPOSITION SIMULATION TESTS FOR CHARACTERIZATION OF TAILINGS USED IN HYDRAULIC FILL DAMS**

## **ABSTRACT**

The social and environmental commitment of a good practice mining demands the study and comprehension of different materials, which integrate the extraction cycle. The knowledge of tailings behavior is as important as the study of the ore or the exploitation process. The deposition of mining waste in safe structures, which allow a suitable control of effluents and waste, is the best way to reduce environmental impacts generated by mining companies. This deposition is often carried out in structures known as tailings dams and, in most cases, the waste is conducted to these structures as slurry or pulps, that are mixtures of waste and water. The waste concentrations in slurries are lesser than in pulps. The slurry is transported by using pipelines and gravity or, in some cases, by pumping systems. In this research it was studied, in a reduced scale model, the behavior of three kinds of tailings during the hydraulic fill formation. With this purpose, tests in the Hydraulic Deposition Simulation Equipment, developed by the University of Brasília and Federal University of Ouro Preto, were carried out. The materials studied were two different gold tailings, from the Morro do Ouro Mine, obtained by different processes, and an iron waste, obtained from the Morro Agudo Mine. For these materials it was studied the influence of the variables, which characterizes the slurry hydraulic deposition (flow rate and slurry concentration) in the distribution of geotechnical parameters along the deposition beaches. Parameters such as specific gravity, initial void ratio, permeability and granulometry were evaluated. The influences of the flow rate and slurry concentration in the beach crest height during the evolution of the deposition simulations were also investigated. From the hydraulic deposition simulation tests it was possible to verify how the slurry viscosity (concentration variation) and flow rate influence the geotechnical parameters, the crest height and the beach final geometry. In parallel, it was studied the iron tailings geoelectric behaviour, as well as the influence of the freeze process in the iron tailings samples volumetric changes.

# ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 GENERALIDADES	1
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	2
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2. PRINCIPAIS CONCEITOS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO, RESISTIVIDADE ELÉTRICA E CONGELAMENTO DE SOLOS	5
2.1. DEPOSIÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO	5
2.2. REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO	10
2.2 REJEITOS DE MINÉRIO DE OURO	13
2.2.1 Processo de cianetação	14
2.2.2 Classificação de rejeitos por ciclonagem	16
2.2.3 Mina Morro do Ouro	17
2.3 LIQUEFAÇÃO DE REJEITOS	19
2.4 ENSAIOS DE SIMULAÇÃO DE DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA	21
2.5 MÉTODOS GEOFÍSICOS	25
2.6 CONGELAMENTO DE SOLOS GRANULARES	26
3. ENSAIOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA, CONGELAMENTO E DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA DE REJEITOS	30
3.1 RESISTIVIDADE ELÉTRICA	31
3.2 CONGELAMENTO DE SOLOS GRANULARES	34
3.3 ENSAIOS DE DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA (ESDH)	35
3.3.1 Equipamento de Simulação de Deposição Hidráulica (ESDH)	36
3.3.2 Metodologia dos ensaios de simulação de deposição hidráulica	37



3.3.3	Materiais utilizados na campanha de ensaios de simulação de deposição hidráulica	40
3.3.4	Campanha de ensaios de simulação de deposição hidráulica	40
3.3.5	Ensaio de permeabilidade ao longo das praias de deposição	41
3.3.6	Determinação do peso específico seco ao longo das praias de deposição	42
3.3.7	Coleta de amostras alteradas ao longo da praia de deposição para caracterização em laboratório	43
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	44
4.1	RESISTIVIDADE ELÉTRICA	44
4.1.1	Calibração do equipamento de resistividade elétrica	44
4.1.2	Ensaio de resistividade elétrica nos materiais Q e Fe	47
4.2	CONGELAMENTO DE REJEITOS GRANULARES	53
4.3	ENSAIOS DE DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA (ESDH)	57
4.3.1	Geometria das praias de deposição e determinação do perfil típico (Melent'Ev, 1973 e Smith et al., 1986)	59
4.3.1.1	Rejeito de minério de ferro	59
4.3.1.2	Rejeito de minério de ouro	64
4.3.1.3	Rejeito de minério de ouro ciclonado ( <i>underflow</i> )	67
4.3.1.4	Comparação dos resultados entre os diferentes materiais	67
4.3.2	Peso específico seco	70
4.3.2.1	Rejeito de minério de ferro	71
4.3.2.2	Rejeito de minério de ouro	72
4.3.2.3	Rejeito de minério de ouro ciclonado ( <i>underflow</i> )	74
4.3.2.4	Comparação dos resultados entre os diferentes materiais	74
4.3.3	Peso específico dos grãos	75
4.3.3.1	Rejeito de minério de ferro	75
4.3.3.2	Rejeito de minério de ouro	78

4.3.3.3	Rejeito de minério de ouro ciclonado ( <i>underflow</i> )	80
4.3.3.4	Comparação dos resultados entre os diferentes materiais	81
4.3.4	Granulometria ou segregação hidráulica	81
4.3.4.1	Rejeito de minério de ferro	82
4.3.4.2	Rejeito de minério de ouro	87
4.3.4.3	Rejeito de minério de ouro ciclonado ( <i>underflow</i> )	92
4.3.4.4	Comparação dos resultados entre os diferentes materiais	93
4.3.5	Índice de vazios nas praias de deposição	94
4.3.5.1	Rejeito de minério de ferro	94
4.3.5.2	Rejeito de minério de ouro	95
4.3.5.3	Rejeito de minério de ouro ciclonado ( <i>underflow</i> )	97
4.3.5.4	Comparação dos resultados entre os diferentes materiais	97
4.3.6	Permeabilidade	98
4.3.6.1	Rejeito de minério de ferro	99
4.3.6.2	Rejeito de minério de ouro	100
4.3.6.3	Rejeito de minério de ouro ciclonado ( <i>underflow</i> )	102
4.3.6.4	Comparação dos resultados entre os diferentes materiais	102
4.3.7	Variação da altura da crista	103
4.3.7.1	Rejeito de minério de ferro	103
4.3.7.2	Rejeito de minério de ouro	105
4.3.7.3	Rejeito de minério de ouro ciclonado ( <i>underflow</i> )	107
4.3.7.4	Comparação dos resultados entre os diferentes materiais	108
4.4	<b>AVALIAÇÃO CONJUNTA DE DIFERENTES RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA (ESDH)</b>	108
4.4.1	Relação entre a permeabilidade e o diâmetro efetivo $D_{10}$	109
4.4.2	Relação entre a permeabilidade e o peso específico seco $\gamma_d$	112
4.4.3	Relação entre o peso específico seco e o diâmetro efetivo $D_{10}$	113

5. CONCLUSÕES	115
5.1 OBSERVAÇÕES DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA	115
5.2 CONCLUSÕES DESTA TESE	116
5.3 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	119
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
A - ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO DOS MATERIAIS Q E Fe PARA A DETERMINAÇÃO DA QUEDA DE VOLTAGEM	127
B - RESUMO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SIMULAÇÃO DE DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA NO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO	130
C - RESUMO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SIMULAÇÃO DE DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA NO REJEITO DE MINÉRIO DE OURO	140
D - RESUMO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SIMULAÇÃO DE DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA NO REJEITO DE MINÉRIO DE OURO CICLONADO ( <i>underflow</i> )	150
E - RESUMO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA NO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO	154
F - RESUMO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA NO REJEITO DE MINÉRIO DE OURO	164
G - RESUMO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA NO REJEITO DE MINÉRIO DE OURO CICLONADO ( <i>underflow</i> )	174
H - REGISTRO FOTOGRÁFICO DOS ENSAIOS E PROCEDIMENTOS REALIZADOS	178

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA</b>		<b>PÁGINA</b>
Tabela 3.1	Propriedades geotécnicas dos materiais concentrado de quartzo (Material Q) e concentrado de ferro (Material Fe)	33
Tabela 3.2	Propriedades de moldagem dos materiais para a realização do ensaio de condutividade elétrica	33
Tabela 3.3	Propriedades geotécnicas dos rejeitos estudados nos ensaios de deposição hidráulica	40
Tabela 3.4	Valores de concentração e vazão esperadas nos ensaios de deposição hidráulica para cada um dos materiais ensaiados	42
Tabela 4.1	Calibração do equipamento em uma solução de água destilada e cloreto de sódio	45
Tabela 4.2	Condutividade e resistividade estimada para cada um dos materiais ensaiados	48
Tabela 4.3	Resultados dos ensaios de congelamento em amostras de rejeito de ferro	54
Tabela 4.4	Valores de concentração e vazão obtidos durante os ensaios de deposição hidráulica para cada um dos materiais ensaiados	58
Tabela 4.5	Valores de inclinação global para cada um dos materiais ensaiados	68
Tabela 4.6	Valores dos parâmetros n e b de ajuste das relações Melent'EV e Smith para cada um dos materiais ensaiados	69
Tabela A.1.	Determinação da resistividade do material Q em condições controladas	128
Tabela A.2.	Determinação da resistividade do material Fe em condições controladas	129

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA		PÁGINA
Figura 2.1	Relação entre o peso específico dos grãos e o teor de ferro em rejeitos de ferro (modificado – Espósito, 2000 e Lopes, 2000).	12
Figura 2.2	Relação de dependência do ângulo de atrito com o índice de vazios e o teor de ferro, para um rejeito de ferro (modificado – Hernandez, 2002)	13
Figura 2.3	Hidrociclone (modificado – Peres <i>et al.</i> , 2002)	17
Figura 2.4	Vazões de movimentação da água para uma seção de solo congelada no topo (modificado – Jones, 1995)	27
Figura 2.5	Varição da sucção na massa de solo devida ao avanço da frente de congelamento (modificado – Jones, 1995)	28
Figura 2.6	Esquema em duas dimensões do processo de congelamento de areias (modificado – Ting <i>et al.</i> , 1983)	29
Figura 3.1	Elementos de um dispositivo geoelétrico	31
Figura 3.2	Esquema do Equipamento de Simulação de Deposição Hidráulica (ESDH) (modificado Ribeiro, 2000)	36
Figura 4.1	Curvas de calibração condutividade vs. voltagem para diferentes frequências de excitação; (a) $f = 500$ Hz; (b) $f = 1000$ Hz; (c) $f = 1500$ Hz.	46
Figura 4.2	Relação ente a porosidade e o fator de formação para os materiais ensaiados	49
Figura 4.3	Relação entre o produto $F \times n^m$ e o grau de saturação: (a) Material Q; (b) Material Fe.	50
Figura 4.4	Relação entre o produto $n^{-m} \times S^{-s}$ e o fator de formação F: (a) Material Q; (b) Material Fe.	51
Figura 4.5	Amostra de rejeito congelado com índice de vazios inicial de 0,818 e grau de saturação de 100%.	55
Figura 4.6	Mudança no índice de vazios em função do grau de saturação após o processo de congelamento de 24 h.	55
Figura 4.7	Reapresentação dos dados de mudança no índice de vazios em função do grau de saturação após o congelamento: (a) $\Delta$ Índice de vazios; (b) $\Delta$ Índice de vazios (%).	56
Figura 4.8	Varição da altura nominal média para as diferentes faixas de concentração e vazão para o rejeito de minério de ferro.	60

Figura 4.9	Variação da inclinação global da praia de deposição hidráulica no rejeito de minério de ferro: (a) Variação em função da concentração; (b) Variação em função da vazão.	61
Figura 4.10	Variação dos parâmetros n e b: (a) n em função da concentração; (b) n em função da vazão; (c) b em função da concentração; (d) b em função da vazão.	63
Figura 4.11	Variação da altura nominal média para as diferentes faixas de concentração e vazão para o rejeito de minério de ouro.	65
Figura 4.12	Variação da inclinação global da praia de deposição hidráulica no rejeito de minério de ouro: (a) Variação em função da concentração; (b) Variação em função da vazão.	66
Figura 4.13	Variação dos parâmetros n e b das praias de rejeito de minério de ouro: (a) n em função da concentração; (b) n em função da vazão; (c) b em função da concentração; (d) b em função da vazão.	66
Figura 4.14	Variação das propriedades geométricas das praias de rejeito de minério de ouro ciclonado ( <i>underflow</i> ): (a) Altura nominal média ( $Q \approx 15$ l/min); (b) Inclinação global.	67
Figura 4.15	Variação da inclinação global da praia de deposição hidráulica para os três materiais estudados: (a) Variação em função da concentração; (b) Variação em função da vazão.	68
Figura 4.16	Variação dos parâmetros n e b das praias de deposição hidráulica para os três materiais estudados: (a) n em função da concentração; (b) n em função da vazão; (c) b em função da concentração; (d) b em função da vazão.	70
Figura 4.17	Variação do peso específico seco para as diferentes faixas de concentração e de vazão para o rejeito de minério de ferro.	72
Figura 4.18	Variação do peso específico seco para as diferentes faixas de concentração e de vazão para o rejeito de minério de ouro.	73
Figura 4.19	Variação do peso específico seco ao longo da praia em função da concentração para uma vazão de 15 l/min para o rejeito de minério de ouro ciclonado ( <i>underflow</i> ).	74
Figura 4.20	Variação do peso específico seco ao longo da praia para os três materiais estudados.	75
Figura 4.21	Variação do peso específico dos grãos ao longo da praia em função da concentração e da vazão para o rejeito de minério de ferro.	76
Figura 4.22	Variação da média dos valores de peso específico dos grãos de todos os ensaios realizados no rejeito de minério de ferro.	77
Figura 4.23	Variação do peso específico dos grãos para as diferentes faixas de concentração e de vazão para o rejeito de minério de ouro.	79
Figura 4.24	Variação da média dos valores de peso específico dos grãos de todos os ensaios realizados no rejeito de minério de ouro.	80

Figura 4.25	Variação do peso específico dos grãos ao longo da praia em função da concentração para o rejeito de minério de ouro ciclonado ( <i>underflow</i> ): (a) Vazão $Q \approx 15$ l/min; (b) Peso específico médio.	80
Figura 4.26	Variação da média dos valores de peso específico dos grãos para os três materiais estudados.	81
Figura 4.27	Variação do diâmetro correspondente a 90% ( $D_{90}$ ) para as diferentes faixas de concentração e vazão para o rejeito de minério de ferro.	82
Figura 4.28	Variação do diâmetro médio $D_{50}$ para as diferentes faixas de concentração e vazão para o rejeito de minério de ferro.	84
Figura 4.29	Variação do diâmetro efetivo $D_{10}$ para as diferentes faixas de concentração e vazão para o rejeito de minério de ferro.	85
Figura 4.30	Variação da porcentagem de material que passa na peneira No. 200 para as diferentes faixas de concentração e de vazão para o rejeito de minério de ferro.	86
Figura 4.31	Variação do diâmetro correspondente a 90% ( $D_{90}$ ) para as diferentes faixas de concentração e vazão para o rejeito de minério de ouro.	88
Figura 4.32	Variação do diâmetro médio $D_{50}$ para as diferentes faixas de concentração e vazão para o rejeito de minério de ouro.	89
Figura 4.33	Variação do diâmetro efetivo $D_{10}$ para as diferentes faixas de concentração e vazão para o rejeito de minério de ouro.	90
Figura 4.34	Variação da porcentagem de material que passa na peneira No. 200 para as diferentes faixas de concentração e de vazão para o rejeito de minério de ouro.	91
Figura 4.35	Variação das propriedades granulométricas $D_{90}$ , $D_{50}$ , $D_{10}$ e porcentagem de passa No. 200 ao longo das praias de deposição para o rejeito de minério de ouro ciclonado.	92
Figura 4.36	Variação do índice de vazios ao longo da praia para as diferentes faixas de concentração e vazão para o rejeito de minério de ferro.	95
Figura 4.37	Variação do índice de vazios ao longo da praia para as diferentes faixas de concentração e vazão para o rejeito de minério de ouro.	96
Figura 4.38	Variação do índice de vazios ao longo da praia em função da concentração para o rejeito de minério de ouro ciclonado.	97
Figura 4.39	Variação do índice de vazios médio $e_{med}$ ao longo da praia para os três materiais estudados.	98
Figura 4.40	Variação da permeabilidade ao longo da praia para as diferentes faixas de concentração e vazão para o rejeito de minério de ferro.	100
Figura 4.41	Variação da permeabilidade ao longo da praia para as diferentes faixas de concentração e vazão para o rejeito de minério de ouro.	101
Figura 4.42	Variação da permeabilidade ao longo da praia em função da concentração para o rejeito de minério de ouro ciclonado.	102

Figura 4.43	Variação da altura da crista (h) com o tempo de ensaio para as diferentes faixas de concentração e vazão para o rejeito de minério de ferro.	104
Figura 4.44	Variação da velocidade inicial de elevação da crista em função da concentração e da vazão para o rejeito de minério de ferro: (a) Velocidade vs. concentração; (b) Velocidade vs. vazão.	105
Figura 4.45	Variação da altura da crista (h) com o tempo de ensaio para as diferentes faixas de concentração e vazão para o rejeito de minério de ouro.	106
Figura 4.46	Variação da velocidade inicial de elevação da crista em função da concentração e da vazão para o rejeito de minério de ouro: (a) Velocidade vs. concentração; (b) Velocidade vs. vazão.	107
Figura 4.47	Variação da altura da crista com o tempo e da velocidade inicial de elevação para o rejeito de minério de ouro ciclonado.	107
Figura 4.48	Variação da velocidade inicial de elevação da crista em função da concentração e da vazão para os três materiais estudados: (a) Velocidade vs. concentração; (b) Velocidade vs. vazão.	108
Figura 4.49	Relação entre a permeabilidade k e o diâmetro efetivo $D_{10}$ para os três materiais estudados: (a) Rejeito de minério de ferro; (b) Rejeitos de minério de ouro.	111
Figura 4.50	Relação entre a permeabilidade k e o diâmetro efetivo $D_{10}$ para os materiais de rejeitos de minério de ouro.	112
Figura 4.51	Relação entre a permeabilidade k e o peso específico seco $\gamma_d$ para os três materiais estudados: (a) Rejeito de minério de ferro; (b) Rejeitos de minério de ouro.	113
Figura 4.52	Relação entre o peso específico seco $\gamma_d$ e o diâmetro efetivo $D_{10}$ para os três materiais estudados: (a) Rejeito de minério de ferro; (b) Rejeitos de minério de ouro.	114
Figura B.1.	Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C10Q10	131
Figura B.2.	Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C10Q15	132
Figura B.3.	Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C10Q20	133
Figura B.4.	Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C15Q10	134
Figura B.5.	Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C15Q15	135
Figura B.6.	Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C15Q20	136
Figura B.7.	Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C25Q10	137



Figura B.8.	Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C25Q15	138
Figura B.9.	Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C25Q20	139
Figura C.1.	Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C10Q10	141
Figura C.2.	Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C10Q15	142
Figura C.3.	Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C10Q20	143
Figura C.4.	Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C15Q10	144
Figura C.5.	Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C15Q15	145
Figura C.6.	Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C15Q20	146
Figura C.7.	Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C20Q10	147
Figura C.8.	Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C20Q15	148
Figura C.9.	Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C20Q20	149
Figura D.1.	Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro ciclonado ( <i>underflow</i> ) – Ensaio Au Cc-C10Q15	151
Figura D.2.	Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro ciclonado ( <i>underflow</i> ) – Ensaio Au Cc-C10Q15	152
Figura D.3.	Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro ciclonado ( <i>underflow</i> ) – Ensaio Au Cc-C10Q20	153
Figura E.1.	Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C10Q10	155
Figura E.2.	Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C10Q15	156
Figura E.3.	Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C10Q20	157
Figura E.4.	Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C15Q10	158

Figura E.5.	Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C15Q15	159
Figura E.6.	Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C15Q20	160
Figura E.7.	Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C25Q10	161
Figura E.8.	Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C25Q15	162
Figura E.9.	Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C25Q20	163
Figura F.1.	Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C10Q10	165
Figura F.2.	Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C10Q15	166
Figura F.3.	Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C10Q20	167
Figura F.4.	Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C15Q10	168
Figura F.5.	Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C15Q15	169
Figura F.6.	Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C15Q20	170
Figura F.7.	Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C25Q10	171
Figura F.8.	Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C25Q15	172
Figura F.9.	Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C25Q20	173
Figura G.1.	Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro ciclonado ( <i>underflow</i> ) – Ensaio Au Cc-C10Q15	175
Figura G.2.	Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro ciclonado ( <i>underflow</i> ) – Ensaio Au Cc-C15Q15	176
Figura G.3.	Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro ciclonado ( <i>underflow</i> ) – Ensaio Au Cc-C25Q15	177

Figura H.1.	Visão geral do Equipamento de Simulação de Deposição Hidráulica	179
Figura H.2.	Camada inicial de uniformização e nivelção do sistema de distribuição do fluxo no canal	179
Figura H.3.	Sistema de armazenamento e mistura da lama	180
Figura H.4.	Estocagem do material de rejeito de minério de ouro em campo	180
Figura H.5.	Estocagem do material rejeito de minério de ouro no laboratório da UnB	181
Figura H.6.	Pesagem do material de rejeito em sacos de 15kg para o controle inicial da concentração antes da realização do ensaio de deposição hidráulica	181
Figura H.7.	Execução do ensaio de deposição hidráulica	182
Figura H.8.	Controle da vazão durante a realização do ensaio de deposição hidráulica	182
Figura H.9.	Detalhe da conformação final da praia de deposição	183
Figura H.10.	Final do ensaio, conformação da parte inicial da praia e controle da altura da crista	183
Figura H.11.	Final do ensaio, lama depositada ao final do canal de deposição hidráulica	184
Figura H.12.	Coleta de amostras indeformadas ao longo da praia para caracterização	184
Figura H.13.	Coleta de amostras deformadas ao longo da praia para caracterização	185
Figura H.14.	Amostras indeformadas e deformadas para caracterização em laboratório	185
Figura H.15.	Determinação da massa úmida e das dimensões das amostras indeformadas	186

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	Área da Seção transversal;
Am.	Nome da amostra;
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
<i>b</i>	Constante que dependente do material e do método de deposição;
<i>c</i>	Concentração (%);
$C_{med}$	Condutividade média;
$C_{NaCl}$	Concentração de NaCl;
$C_o$	Condutividade;
$C_{ond} M_{ed}$	Condutividade média (ms);
CU	Coefficiente de uniformidade;
D	Diâmetro da amostra na câmara (mm);
DAM	Drenagem Ácida de Mina;
$D_{10}$	Diâmetro efetivo;
$D_{50}$	Diâmetro médio;
$D_{60}$	Diâmetro correspondente a 60%;
$D_{90}$	Diâmetro correspondente a 90%;
ESDH	Ensaio de Simulação de Deposição Hidráulica;
<i>e</i>	Índice de vazios;
$e_c$	Índice de vazios da amostra após o processo de congelamento durante 48 horas;
$e_{máx}$	Índice de vazios máximo;
$e_{min}$	Índice de vazios mínimo;
$e_r$	Índice de vazios real;
F	Fator de Formação;
<i>f</i>	Frequência de excitação;
Fe	Conteúdo de ferro;
$F_f$	Fator de Formação da massa;
H	Elevação máxima;
$H_{1,2}$	Carga piezométrica no tempo $t_{1,2}$ (mm);
$h_n$	Sucção da massa de solo não congelada;

$h_o$	Sucção na borda da frente de congelamento;
$h_s$	Sucção da massa de solo congelada;
$I$	Intensidade da corrente;
$kN$	Quilo-Newton;
$k_v$	Permeabilidade vertical na câmara (mm/s);
$L$	Comprimento da amostra;
$L_c$	Comprimento do condutor;
$L_p$	Comprimento da praia;
$M$	Massa úmida da amostra;
$m$	Razão de transformação $m = \sqrt{k_h/k_v}$ ;
$NaCl$	Cloreto de Sódio;
$n$	Parâmetro adimensional que depende do material e do método de deposição;
$n$	Porosidade (%);
$n_{max}$	Porosidade máxima;
$n_{min}$	Porosidade mínima;
$NQ$	Nota qualitativa da trabalhabilidade da amostra (0 a 5);
$n_r$	Porosidade real (%);
$Q$	Vazão total (l/min);
$R$	Resistividade (Ohm.m);
$S$	Grão de saturação (%);
$S_a$	Salinidade;
$S_{final}$	Porcentagem de saturação final (%);
$SiO_2$	Óxido de silício;
$S_r$	Porcentagem de saturação real (%);
$S_{real}$	Saturação ao final da compactação da amostra;
$T$	Temperatura (°C);
$t_{1,2}$	Tempo (s);
$V$	Volume da amostra;
$V_s$	Volume de sólidos;
$V_T$	Volume total da amostra;
$V_v$	Volume de vazios ao final do processo de compactação;

$V_{vc}$	Volume de vazios da amostra após o congelamento durante 48 horas;
$V_w$	Volume de água;
$w$	Umidade (%);
$w_f$	Umidade final esperada (%);
$w_h$	Umidade higroscópica (%);
$W_s$	Peso dos sólidos (g);
$W_{uh}$	Peso dos sólidos úmidos na umidade higroscópica (g);
$W_{uw}$	Peso dos sólidos úmidos na umidade final (g);
$\Delta_{y/H}^2$	Somatória das diferenças quadráticas entre o valor real e o valor estimado para cada x/L;
$\Delta e$	Varição do índice de vazios entre as fases antes e após o congelamento;
$\Delta e_{\%}$	Varição porcentual da mudança do índice de vazios;
$\Delta V$	Queda de voltagem;
$\Delta V_w$	Diferença de volume de água a ser acrescentado;
$\Delta W_{uw}$	Diferença de peso de material a ser acrescentado (g);
$\gamma_w$	Peso específico da água;
$\rho$	Resistividade elétrica;
$\rho_o$	Resistividade da massa saturada;
$\rho_s$	Massa específica dos grãos.
$\rho_w$	Resistividade da água de saturação;

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 GENERALIDADES

Desde sua origem, o homem tem tratado de diversas maneiras de fornecer as ferramentas necessárias para fazer com que suas condições de vida melhorem com o passar das gerações. Nas idades do bronze e do ferro as sociedades descobriram nos metais os elementos propícios para a elaboração de ferramentas, permitindo o desenvolvimento de utensílios, armas, jóias e outros elementos. É nesta parte da história da humanidade que começa a exploração dos minerais como fonte de riqueza e tecnologia para os povos. Na idade contemporânea a exploração dos minerais representa um dos segmentos mais importantes dentro das economias globalizadas dos países.

Na atualidade, os processos de extração e transformação dos minerais se fazem com a utilização de métodos de mineração que visam obter o maior benefício das reservas exploradas, permitindo satisfazer as necessidades dos clientes compradores dos minérios e das sociedades nas quais se encontram localizadas as reservas. A legislação ambiental brasileira impõe às mineradoras normas claras por meio das quais se objetiva a redução dos impactos ambientais gerados pelo ato de minerar, abrindo as portas para a concepção de uma mineração moderna, de acordo com as políticas nacionais e internacionais de conservação do meio ambiente.

Como conseqüências da mineração de diversos metais, obtêm-se vários subprodutos, conhecidos como efluentes sólidos e/ou efluentes líquidos, que apresentam um baixo valor

comercial e um alto potencial de poluição ambiental. Além da carga sólida, geralmente há contaminantes físico-químicos, como soluções de metais tóxicos, radioatividade, acidez e outros que fazem com que estes efluentes tenham que ser contidos e/ou tratados com o objetivo de minimizar o impacto no ambiente. Estes efluentes variam em proporção, por unidade de minério extraído, dependendo do tipo de minério, passando de 40% no caso do ferro a 99,99% no caso do ouro (Abrão, 1987).

Uma das principais formas de tratamento destes efluentes é sua deposição em superfície, na forma de pilhas ou em reservatórios contidos por diques ou barragens. A escolha de um método ou outro depende de diversos elementos, onde um dos mais importantes é a forma de descarte dos efluentes, que pode ser a forma sólida ou a forma de polpa (água com sólidos).

O presente trabalho aborda o tema da caracterização de rejeitos a serem utilizados em barragens de aterro hidráulico como um dos elementos fundamentais no entendimento do comportamento deste tipo de estrutura, objetivando otimizar os recursos humanos e econômicos disponíveis nas mineradoras e obtendo estruturas que se ajustem às condições de segurança, estabilidade e funcionalidade, necessárias para sua adequada implementação.

## **1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA**

Esta pesquisa teve como objetivo principal analisar os princípios da deposição dos materiais de rejeito de ferro, rejeito de ouro e rejeito de ouro ciclonado nas praias de deposição, em condições mais próximas da realidade dos processos de mineração. Inicialmente, foi explorada a técnica de amostragem por congelamento com o objetivo de obter amostras representativas que permitam uma avaliação dos parâmetros geomecânicos dos depósitos hidráulicos modelados no desenvolvimento do trabalho. Em seguida, foi estudada a potencialidade de utilizar o método geofísico de resistividade para a caracterização do material de rejeito, basicamente devido à forte dependência que tem a resistividade de uma massa de solo com a proporção de elementos metálicos presentes na sua estrutura, para o caso do rejeito de minério de ferro. Posteriormente, estudou-se como a natureza do processo de deposição condiciona a distribuição espacial dos parâmetros que regem as condições de estabilidade destas estruturas como peso específico seco, granulometria, peso específico dos grãos, permeabilidade, índice de vazios, entre outros.



Foram utilizadas informações contidas na literatura de diferentes grupos de pesquisa, espalhados pelo país e pelo mundo que, na atualidade, estudam estes materiais, com a finalidade de que os resultados da pesquisa sejam, na realidade, representativos do comportamento deste tipo de material, e não só das amostras utilizadas no presente trabalho.

### **1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Para uma melhor apresentação dos conceitos e dos resultados obtidos durante o desenvolvimento do presente trabalho, a estrutura do texto desta tese foi dividida em cinco partes. No Capítulo 1 foi realizada uma breve introdução, a problemática da disposição de resíduos sólidos de mineração e foi apresentado o objetivo geral da pesquisa.

O Capítulo 2 trata de uma revisão bibliográfica do estado da arte da disposição de resíduos de mineração no Brasil e no mundo. Neste capítulo são apresentados os principais conceitos relacionados ao congelamento de amostras granulares, assim como os princípios utilizados na avaliação das condições de resistividade elétrica dos meios granulares. Outro aspecto importante tratado neste capítulo é o ensaio de deposição hidráulica e suas principais características.

No Capítulo 3 são apresentadas as metodologias utilizadas na realização dos ensaios de resistividade elétrica e de congelamento dos rejeitos de minério de ferro. Será realizada uma descrição do equipamento de deposição hidráulica desenvolvido na Universidade de Brasília e que foi empregado na realização dos ensaios desta pesquisa. São apresentadas as principais características de concentração e vazão esperadas nos ensaios de deposição hidráulica realizados nos rejeitos de minério de ferro, minério de ouro não ciclonado e minério de ouro ciclonado. Neste capítulo são igualmente discutidas as técnicas de amostragem para a avaliação das propriedades geotécnicas dos depósitos hidráulicos e as mudanças metodológicas adotadas para se obter o maior proveito dos ensaios de deposição hidráulica.

Os resultados das campanhas de ensaios de laboratório são apresentados e analisados no Capítulo 4. Assim, são discutidas as propriedades geoeletricas do rejeito de minério de ferro e o comportamento de amostras de rejeito congelado. São amplamente discutidos os resultados

dos ensaios de deposição hidráulica em termos das características geométricas das praias de deposição, do peso específico seco, do peso específico das partículas, das variações granulométricas, do índice de vazios, da permeabilidade e da altura da crista com o tempo de ensaio.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas na pesquisa, assim como as sugestões para trabalhos futuros que tem como principal objetivo dar continuidade a esta linha de pesquisa e resolver as inquietudes que surgiram durante o desenvolvimento da mesma.

Em seguida são apresentadas as referências bibliográficas que dão base a esta investigação. Finalmente, oito apêndices apresentam o registro dos resultados obtidos nos ensaios de resistividade elétrica, as fichas de laboratório dos ensaios de deposição hidráulica e um importante registro fotográfico abrangente dos ensaios realizados e dos materiais utilizados.

## **CAPÍTULO 2**

### **2. PRINCIPAIS CONCEITOS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO, RESISTIVIDADE ELÉTRICA E CONGELAMENTO DE SOLOS**

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre os principais elementos que fazem parte da presente pesquisa tais como os rejeitos de minério de ferro e de ouro, o potencial de liquefação destes materiais, os ensaios de simulação de deposição hidráulica, o método geofísico de resistividade e a técnica de congelamento de solos.

#### **2.1. DEPOSIÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO**

A mineração gera como subprodutos os rejeitos, que são materiais de pouco valor comercial e que podem apresentar um alto poder contaminante. Estes materiais podem ser descartados da unidade de beneficiamento, na forma sólida de pasta, torta ou granel, que são transportados por meio de caminhões ou correias transportadoras, ou na forma de polpa, que é uma mistura de água mais sólidos. Esta polpa, geralmente, é transportada por meio de tubulações com a utilização de sistemas de bombeamento ou com a ajuda da gravidade. A deposição destes materiais pode ser feita em superfície, em cavidades subterrâneas ou em ambientes subaquáticos. A seleção de um método ou outro para a disposição dos rejeitos depende da natureza do processo de mineração, das condições geológicas e topográficas da região, das propriedades mecânicas dos materiais e do poder contaminante do rejeito.

Os diferentes processos de beneficiamento têm como finalidade a regularização do tamanho dos fragmentos, a remoção de minerais associados sem valor econômico e o aumento da

qualidade, pureza ou teor do produto final, que são propriedades e características adequadas para sua comercialização, satisfazendo as necessidades do mercado e dos clientes. Dentre os principais processos utilizados para o beneficiamento do minério pode-se destacar a britagem, o peneiramento, a lavagem, a secagem e a calcinação. Dependendo do tipo de minério explorado pode-se utilizar processos como concentração por densidade (espirais), separação magnética, separação eletrostática, ciclonagem, aglomeração, flotação e pirólise. Cada um destes processos gera um tipo de rejeito diferente, com propriedades variáveis dependendo da intensidade do tratamento, da forma de transporte e dos processos de deposição.

Os rejeitos que são transportados na forma de mistura com água são caracterizados, do ponto de vista geotécnico como materiais de granulometria fina, variando desde colóides com índice de plasticidade entre médio a alto e que são denominados de lamas, até materiais granulares como areias finas ou grossas, não plásticos e que são denominados de rejeitos granulares. Em geral, a forma e o tamanho dos grãos dependem do tipo de minério que está sendo explorado, das naturezas geológicas das reservas e dos diferentes processos de beneficiamento.

Os rejeitos apresentam uma massa específica dos grãos que depende do minério explorado e mais especificamente de sua mineralogia, assim como dos processos de beneficiamento. Estes elementos, somados com os processos de transporte e deposição, fazem com que os depósitos obtidos apresentem densidade aparentemente seca e índice de vazios altamente variáveis. No caso dos rejeitos hidraulicamente depositados, a permeabilidade, em geral, encontra-se condicionada à granulometria, à porosidade, às condições de saturação e, principalmente, às condições de deposição e estratificação dos depósitos formados.

Nos rejeitos granulares, a resistência ao cisalhamento está condicionada ao comportamento da fração areia, sendo importante a contribuição da fração fina (argila e silte) nas condições em que estes materiais apresentem estratificações ou o material seja classificado como um material fino. Outro elemento importante na caracterização do comportamento mecânico dos rejeitos é o tipo de carregamento, sua intensidade, duração e período de ocorrência, como no caso de carregamentos cíclicos como sismos, explosões ou tráfego.

As barragens de rejeito são estruturas criadas com a finalidade de armazenar e tratar os efluentes sólidos, produzidos em grande quantidade, provenientes da mineração. Dependendo das propriedades mecânicas dos rejeitos, as barragens podem ser alteadas com o mesmo

efluente ou com material de empréstimo ao longo da vida útil da mina. O projeto de barragens de rejeito, a construção e a desativação devem garantir a segurança física dos barramentos, com suas respectivas estruturas, por períodos de tempo muito longos, normalmente maiores que a própria vida útil da mina, salvaguardando todo o ambiente circunvizinho de quaisquer efeitos prejudiciais advindos de seu funcionamento como, por exemplo, percolação de efluentes contaminantes, rupturas parciais ou totais das estruturas e outros (Lo & Klonh, 1996a e 1996b, citados por Cavalcante, 2000).

Existem três métodos básicos para o alteamento de uma barragem de contenção de rejeitos: o método de montante, o método de jusante e o método da linha de centro. A diferença entre um e outro método está em função do sentido do alteamento em relação ao dique de partida. O material utilizado nas diferentes etapas de construção da barragem pode ser o próprio rejeito, sendo classificado com a utilização de ciclonação ou praias de segregação (Abrão, 1987 e Busch *et al.*, 1999), para a seleção da fração grosseira, de maior resistência e permeabilidade, que adicionalmente apresenta menor compressibilidade. O material é lançado a partir da crista e serve também de fundação para a seguinte fase do alteamento.

A legislação ambiental brasileira anterior estabelecia rígidas normas para as companhias dedicadas à mineração, exigindo um elevado controle dos diferentes processos de exploração, assim como para a disposição dos resíduos originados do beneficiamento do minério, recomendando a utilização de barragens de rejeito, mas não estimulando o uso de barragens alteadas pelo método de montante (ABNT, 1993a e 1993b).

Dentro das práticas normais das empresas mineradoras, o método de montante tem ganhado um importante espaço graças aos seus baixos custos e à alta flexibilidade construtiva. As barragens construídas pelo método de montante com a utilização de rejeitos como materiais de construção apresentam em seu comportamento grandes problemas, como alta susceptibilidade ao *piping*, superfícies erodíveis e alta probabilidade de liquefação (Chammas, 1989, citado por Cavalcante, 2000). Parra & Lasmar (1987) apresentaram o caso histórico de ruptura da barragem de rejeito da mina do Fernandinho em maio de 1986, construída pelo método de montante. Parra & Ramos (1987) apresentaram o caso histórico da barragem de rejeito da mina do Pico São Luiz em outubro de 1986, construída pelo método da linha de centro e que, durante seus primeiros alteamentos, apresentou numerosos problemas de estabilidade devido a práticas errôneas durante sua construção.

Na atualidade a crescente conscientização das sociedades que são impactadas pelas barragens de rejeito tem obrigado as empresas mineradoras a ministrar um tratamento diferente a este tipo de barragem. Amorim *et al.* (2005) apresentam o caso de avaliação da segurança de treze barragens de contenção de sedimentos no complexo minerador de Itabira – MG (a pedido da Companhia Vale do Rio Doce). Como resultado deste trabalho foram propostos ajustes construtivos em algumas das barragens que objetivaram incrementar a segurança geotécnica, hidráulica - hidrológica e estrutural.

Um crescente número de organizações internacionais e órgãos de diferentes governos tem mostrado, nas últimas décadas, sua preocupação com a segurança e estabilidade de estruturas de contenção de resíduos de mineração. Nos Estados Unidos, a Agência de Proteção Ambiental (EPA) elaborou um relatório técnico em 1994 que tem como finalidade orientar o projeto e o estudo de barragens de rejeito dentro do território americano. Nesse trabalho são apresentadas as técnicas construtivas anteriormente discutidas e os principais cuidados que devem ser tomados para garantir a estabilidade estrutural das barragens (EPA, 1994). Nesse relatório, a EPA ressalta a importância dos diferentes fatores que afetam a segurança das estruturas tais como a localização das instalações, a topografia do local, a hidrologia da região, a geologia e hidrogeologia, as condições de fundação e as características sísmicas regionais e locais. Esse trabalho enfatiza a importância da realização de análises de estabilidade e percolação nas diferentes fases de projeto das barragens de rejeito para garantir a estabilidade das mesmas. Adicionalmente, orienta a realização de um monitoramento periódico durante as fases de construção e operação, assim como após a desativação, para a prevenção de problemas que possam vir a comprometer a estabilidade das estruturas ou pôr em risco a sociedade ou o meio ambiente.

O Departamento de Minerais e Energia do Oeste da Austrália (DMEWA) publicou, em 1998, um guia para o projeto, execução e manutenção de estruturas de estocagem de resíduos de mineração (DMEWA, 1998). Nesta publicação ressalta-se a orientação para a elaboração de um plano de emergência para o caso de acontecer uma ruptura ou a iminência de ruptura, bem como as medidas a serem adotadas pela empresa mineradora, governo e equipes de socorro.

No ano de 1997, a Comissão Parlamentar de Meio Ambiente (PCE) do parlamento da Nova Zelândia elaborou um documento, no qual define os requisitos mínimos que devem ser

cumpridos para a manutenção das barragens de contenção de rejeitos, com o objetivo de garantir o menor impacto ambiental em longo prazo. Neste documento, a PCE apresenta a legislação que rege os empreendimentos de mineração na Nova Zelândia (até a data da publicação do documento), faz uma descrição dos impactos ambientais dos empreendimentos de mineração e, mais especificamente, das barragens de contenção de rejeitos. No mesmo documento também são definidos os estágios necessários para o desenvolvimento dos projetos de implantação de barragens de contenção de rejeitos, assim como a exigência da realização de um estudo de viabilidade ambiental e, o mais importante, define as diretrizes que devem ser seguidas com o objetivo de garantir a manutenção das barragens de contenção de resíduos de mineração, após o fechamento da lavra ou da exploração comercial da mina.

A Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD) tem publicado ao longo da sua história um número considerável de trabalhos técnicos que têm como objetivo aprofundar no estudo do comportamento destas estruturas e orientar os novos empreendimentos dentro das técnicas construtivas mais apuradas e aprimoradas para a elaboração de projetos de barragens de rejeitos mais seguras durante sua operação e após seu fechamento. Entre as publicações da ICOLD, destaca-se o boletim N°. 121 publicado no ano de 2001, elaborado em conjunto com as Nações Unidas durante o desenvolvimento de um dos projetos do PNUE. Neste documento, faz-se uma recompilação de um grande número de experiências adquiridas da ruptura de mais de 200 barragens de rejeito por todo o mundo. No trabalho são apresentadas as diferentes causas que levaram à ruptura das estruturas e seu impacto. Também se discutem, de forma separada, os principais elementos da mecânica dos solos que influenciam a estabilidade destas estruturas (ICOLD & UNEP-PNUE, 2001).

Apesar do vasto conhecimento, contido na literatura, das diferentes técnicas empregadas para o projeto e a construção de barragens de rejeito, o fator humano ainda é o elemento que define o sucesso ou o fracasso deste tipo de empreendimento. A influência do fator humano como elemento marcante no projeto de barragens de rejeito é bem apresentado por Gipson (2003). Neste trabalho, o autor discute como a falta de conhecimento ou, em alguns casos, a negligência, tem como conseqüências finais a ruptura destas estruturas com seus enormes impactos ambientais, sociais e econômicos.

## 2.2. REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO

Diferentes grupos de pesquisa têm estudado o comportamento dos rejeitos de mineração com o objetivo de compreender os processos de deposição e como estes influenciam nas propriedades geotécnicas das praias formadas. A seguir serão apresentadas algumas das principais conclusões de alguns dos grupos de pesquisadores, mais especificamente relacionadas aos rejeitos granulares.

Com a finalidade de avaliar o comportamento geotécnico das barragens de contenção de rejeitos hidráulicamente depositados, Assis & Espósito (1995) e Espósito (1995) sugerem estabelecer uma analogia entre a energia de compactação em uma barragem convencional e a energia de deposição num aterro hidráulico. No caso das barragens convencionais, o peso do equipamento, o número de passadas e a espessura da camada nas barragens convencionais são considerados equivalentes à vazão, à concentração e à altura de queda da lama, no caso dos aterros hidráulicos.

Tendo como ponto de partida esta equivalência e com a finalidade de realizar um adequado controle das condições de campo nos processos de deposição dos rejeitos, e uma avaliação das condições geotécnicas de estabilidade das pilhas de rejeito, Espósito (1995) propôs uma metodologia geotécnica de controle de qualidade de barragens de rejeito baseada na coleta de amostras de campo. A pesquisa inclui a determinação da densidade *in-situ*, da umidade, da granulometria e da massa específica dos grãos, e, posteriormente, da porosidade, da frequência de ocorrência das porosidades pós-deposição hidráulica, da obtenção dos parâmetros de resistência do rejeito em laboratório, do estabelecimento das correlações entre a porosidade e os parâmetros de resistência ao cisalhamento. Com base nestas avaliações, foram geradas distribuições estatísticas dos parâmetros de resistência, o cálculo das médias e os desvios padrões e, por último, uma análise probabilística da estabilidade, considerando a variabilidade dos parâmetros de resistência, fornecendo o fator de segurança e a confiabilidade ou probabilidade de risco da barragem de rejeito (Espósito *et al.*, 1997; Espósito & Assis, 1998 e 1999; e Espósito, 2000). Tal abordagem pode ser estendida aos demais parâmetros geomecânicos (deformabilidade e permeabilidade).

Lopes (2000) apresenta uma revisão desta metodologia, ampliando o número de dados da amostra, estudando a influência da granulometria e da composição química nos parâmetros de



resistência do rejeito, tratando de obter uma correlação entre a porosidade e o ângulo de atrito para várias faixas granulométricas e diferentes teores de ferro. Também realizou uma análise da estabilidade da pilha do Xingu, Mina da Alegria, reavaliando conjuntamente os dados obtidos por Espósito & Assis (1997), concluindo que a metodologia apresenta resultados satisfatórios nos processos de avaliação das condições geotécnicas deste tipo de materiais.

Outros trabalhos aprofundam o entendimento do comportamento destes materiais em condições estáticas. Hernandez (2002), Hernandez & Assis (2002a e 2002b) e Hernandez *et al.* (2002) exploram ainda mais a influência do conteúdo de ferro nas propriedades de resistência dos rejeitos. Os autores utilizaram ensaios de cisalhamento direto, drenados, em amostras que apresentam basicamente a mesma granulometria, mas conteúdos de ferro variáveis. Outro trabalho de pesquisa, comprovando o encontrado por Lopes e Hernandez, é apresentado por Presotti (2002) e Ribeiro *et al.* (2003), com a realização de ensaios triaxiais em amostras com teores de ferro variáveis. No entanto, na metodologia utilizada por todos estes autores não é feita uma avaliação detalhada da influência das variações das condições granulométricas nos parâmetros de resistência.

Diversas publicações abordam o tema do comportamento do rejeito depositado hidraulicamente. Cavalcante (2000), Cavalcante & Assis (2002a, 2002b e 2003) e Cavalcante *et al.* (2002) apresentam uma análise do efeito do gradiente de permeabilidade gerado durante os processos construtivos das barragens alteadas com rejeitos granulares, com a utilização da técnica de aterro hidráulico pelo método de montante, implementando um modelo onde a condutividade hidráulica nas análises de percolação é realizada de forma acoplada com os efeitos mecânicos, possibilitando definir novos perfis de condutividade hidráulica e modelando a variação das propriedades do material com o adensamento. Cavalcante *et al.* (2003) apresentaram uma análise de dados de resistência de rejeito de minério de ferro à luz dos conceitos apresentados por Bolton (1986, 1987a e 1987b), em que são relacionadas as propriedades de resistência e dilatância do material com as condições de densidade relativa e teores de ferro. Este estudo é um passo adiante no entendimento do comportamento mecânico destes materiais e constitui uma valiosa contribuição no estudo das condições que definem o potencial de liquefação dos rejeitos de minério de ferro.

Küpper *et al.* (1992a e 1992b), Ribeiro *et al.* (1998), Ribeiro & Assis (1999) e Ribeiro (2000) apresentam uma discussão sobre o efeito das variáveis de deposição hidráulica no

comportamento geotécnico de barragens de rejeito, avaliando os aspectos físicos dos processos de deposição e realizando uma modelagem em laboratório das condições de campo. Para a realização destas pesquisas foram construídos Equipamentos de Simulação de Deposição Hidráulica (ESDH) que permitem modelar as condições de deposição em laboratório. Estes equipamentos possibilitam o controle de algumas das variáveis envolvidas no processo, permitindo o estudo da influência destas nas praias de deposição obtidas.

Os rejeitos de minério de ferro apresentam uma grande variabilidade das suas propriedades em função das mudanças do conteúdo de ferro neles presente. Este fenômeno pode ser ilustrado de forma simples com a análise do comportamento do peso específico dos grãos do material de rejeito. Espósito (2000) e Lopes (2000) apresentaram gráficos e correlações teóricas e empíricas que têm como objetivo expressar a relação entre o teor de ferro e o peso específico. Na Figura 2.1 estão plotados os dados de peso específico dos grãos e teor de ferro apresentados por Espósito (2000) e Lopes (2000).

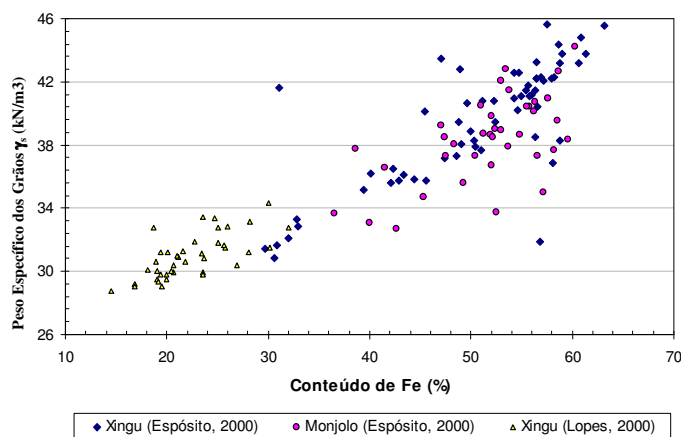


Figura 2.1 Relação entre o peso específico dos grãos e o teor de ferro em rejeitos de ferro (modificado – Espósito, 2000 e Lopes, 2000).

Nesta figura, encontram-se todos os dados apresentados na bibliografia citada. Desta forma, não é possível afirmar que o comportamento dos materiais de rejeito é similar ao comportamento das areias, baseado exclusivamente no fato de que, na análise granulométrica dos materiais, estes sejam classificados como areias (Lopes, 2000).

De forma similar, os parâmetros de resistência do rejeito são afetados pelo conteúdo de ferro presente no material. A Figura 2.2 apresenta a variação do ângulo de atrito de materiais de um rejeito de minério de ferro estudado por Hernandez (2002). Ainda não é possível definir uma lei comportamental para este parâmetro, mas é possível concluir que o ângulo de atrito do rejeito de minério de ferro encontra-se afetado pelo índice de vazios inicial, como todos os materiais granulares e, adicionalmente, pelo conteúdo de ferro presente, característica única destes materiais.

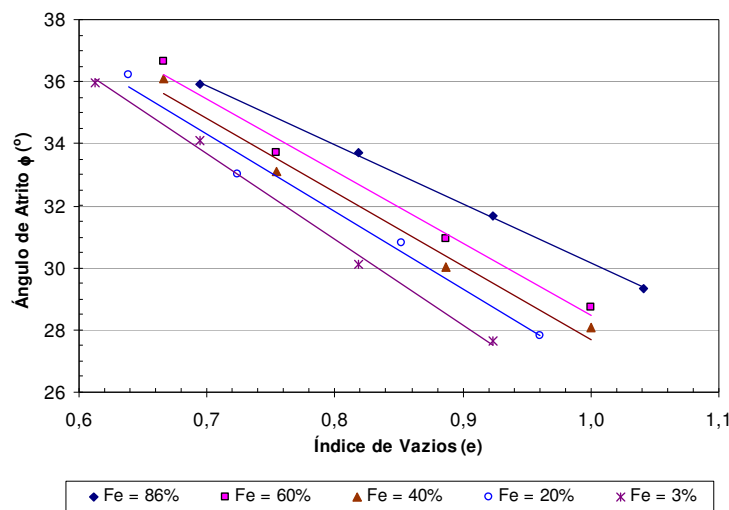


Figura 2.2 Relação de dependência do ângulo de atrito com o índice de vazios e o teor de ferro, para um rejeito de ferro (modificado – Hernandez, 2002)

## 2.2 REJEITOS DE MINÉRIO DE OURO

Durante todo o período anterior ao desenvolvimento do processo de cianetação, a extração do ouro envolveu, quase que exclusivamente, o uso da separação gravítica e de operações e processos complementares a esta, tais como a cominuição (britagem e moagem), a classificação e, posteriormente, a amalgamação. A utilização destas técnicas baseava-se em três importantes características do metal, que são: (i) sua elevada densidade no estado puro, muito superior àquelas de minerais de gema, como os silicatos, o que indica o uso de operações de concentração gravítica; (ii) hidrofobicidade natural, sendo aproveitada com a utilização de rampas cobertas de lã de carneiro que conjugam seu elevado peso específico com a hidrofobicidade do metal para realizar sua extração e; (iii) capacidade de ser

incorporado ao mercúrio. Porém, a utilização mais ampla do processo de amalgamação ocorreu a partir do século XIV, na Europa Central (Ciminelli & Gomes, 2002).

### 2.2.1 Processo de cianetação

O processo de cianetação convencional foi patenteado em 1887 e 1888 pelos escoceses John S. MacArthur e os irmãos Robert e William Forrest. O processo é iniciado com a cominuição do minério até uma granulometria adequada às etapas seguintes. A concentração em mesas estáticas e vibratórias, jígues, concentradores tipo Knelson, dentre outros, é utilizada para a remoção de grãos de ouro livre. A etapa de pré-oxidação inclui desde a agitação da polpa em pH alcalino (pré-aeração), visando a passivação de sulfetos solúveis na cianetação, até a oxidação completa de sulfetos auríferos contendo ouro finamente disseminado, através da bio-oxidação, ustulação ou oxidação sob pressão. A lixiviação por cianeto em meio alcalino pode ser realizada em pilhas de estéril ou de rejeitos, em pilhas de minério, em tanques estacionários ou em tanques com agitação (Ciminelli & Gomes, 2002).

A lixiviação em pilhas, devido aos baixos investimentos e custos operacionais, pode ser utilizada para o aproveitamento de minérios marginais ou rejeitos. A recuperação, nesses casos, é relativamente baixa, da ordem de 50 a 85%, os ciclos são longos e o consumo de reagentes é elevado. A lixiviação em pilhas de minério é o principal método de beneficiamento de minérios oxidados de ouro de baixo teor.

A lixiviação em tanques estacionários apresenta resultados intermediários entre a lixiviação em pilhas e a lixiviação em tanques agitados, em termos de recuperação metalúrgica alcançada, investimento e custos operacionais envolvidos, sendo preterida em relação à técnica de lixiviação em pilhas.

A lixiviação em tanques agitados é muito utilizada para tratar minérios que requerem moagem, com teores geralmente superiores a 2g Au/t, que justifiquem o investimento e os custos operacionais mais altos. Recuperações superiores a 90% são, em geral, alcançadas com esta técnica.

A concentração de ouro em soluções cianetadas pode variar dentro de uma faixa bem extensa, fato que influencia em muito os processos de recuperação. Atualmente, os dois principais processos utilizados na indústria são: a absorção do ouro em carvão ativado para tratamento de polpas obtidas na etapa de cianetação, sem separação sólido/liquido; e a precipitação através da utilização de pó de zinco para o tratamento de soluções clarificadas (Freitas & Costa, 2002).

A precipitação com zinco era o método preferido até os anos 70, época em que os processos à base de carvão ativado tiveram grande impulso. Entretanto, há casos em que se deve ainda optar pela precipitação com zinco tais como no tratamento de minérios com alto teor de prata, no caso de minérios contendo materiais que interferem com a absorção em carvão (alto teor de argilas ou matéria orgânica) e, no caso do aproveitamento de pequenos corpos minerais, para os quais não se justificam os investimentos com eluição e regeneração, além do alto custo do carvão ativado (Freitas & Costa, 2002).

Rejeitos resultantes da operação de lixiviação em instalações para o processamento de minérios auríferos sulfetados, porém, não são geradores de ácido. Este é o caso de minérios auríferos refratários onde o ouro encontra-se frequentemente ocluído em sulfetos e não disponível ao cianeto de sódio, empregado industrialmente na lixiviação. Neste caso, o minério é submetido a uma etapa de oxidação dos sulfetos, que torne o metal disponível. Os rejeitos da cianetação, sem a presença de sulfetos, não oferecem riscos de geração de drenagem ácida de mina (DAM) (Borma & Soares, 2002).

Um minério aurífero rico em sulfetos, no entanto, pode não ser refratário. Desta forma será lixiviado sem oxidação prévia. A cianetação é realizada industrialmente com pH entre 10 e 11 e o rejeito desta operação é usualmente disposto em barragens de rejeito como uma polpa alcalina. Os riscos da geração de drenagem ácida de mina (DAM), por parte destas estruturas, são pequenos.

Segundo Borma & Soares (2002), as operações de beneficiamento que antecedem a lixiviação destes minérios, no entanto, podem envolver etapas de concentração gravítica e flotação que geram rejeitos contendo sulfetos. Estes serão geradores de drenagem ácida, se dispostos de forma inadequada.

### 2.2.2 Classificação de rejeitos por ciclonagem

Os processos de classificação consistem em separar uma população de partículas em duas outras, uma com proporção significativamente maior de partículas grosseiras e outra com maior proporção de partículas finas. De forma geral, a classificação é executada com dois objetivos. O primeiro é selecionar partículas suficientemente finas (portanto, com elevado grau de liberação) para alimentar o processo de concentração, especialmente a flotação, daquelas que devem retornar ao processo de moagem. E o segundo é eliminar partículas muito finas, nocivas à etapa subsequente (Peres *et al.*, 2002).

Durante décadas a classificação foi realizada em classificadores espirais. Há cerca de 50 anos esses equipamentos passaram a ser substituídos por hidrociclones, ou simplifiadamente, ciclones (ver Figura 2.3), invenção do *Dutch State Mines Department*, da Holanda. Hoje é considerado equipamento padrão para classificação fina, entre 850mm e 2mm. Segundo Peres *et al.* (2002), as principais vantagens do ciclone em relação aos classificadores espirais são sua elevada capacidade, em termos de volume ou área ocupada, a facilidade de controle operacional, a operação relativamente estável e a entrada em regime operacional em curto período de tempo. Outras vantagens são a fácil manutenção e o baixo investimento, que viabiliza a colocação de unidades reserva. As desvantagens são a geração de um maior custo operacional, devido à energia gasta no sistema de bombeamento, a incapacidade de armazenar grande volume de polpa e, com isso, de ter efeito regulador com uma menor eficiência de classificação.

O movimento circular da lama dentro do ciclone 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 ser projetadas em direção às paredes, mas como o espaço já está ocupado pelas partículas grosseiras são empurradas para o centro do ciclone. Partículas extremamente finas

se incorporam ao meio líquido e se dividem entre *underflow* e *overflow*, de acordo com a participação da água entre esses fluxos (Peres *et al.*, 2002).

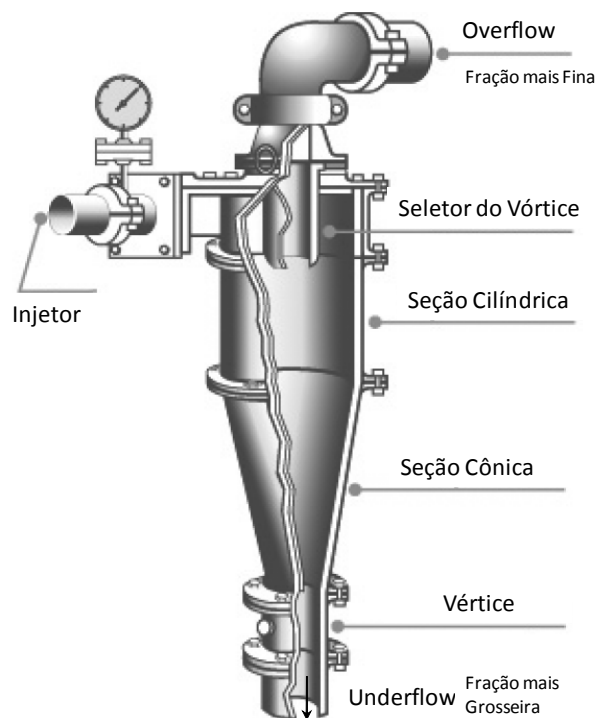


Figura 2.3 Hidrociclone (modificado – Peres *et al.*, 2002)

### 2.2.3 Mina Morro do Ouro

A mina Morro do Ouro, localizada ao norte da cidade de Paracatu, estado de Minas Gerais (MG), está inserida na porção centro-leste da faixa de dobramentos Brasília, mais precisamente nos filitos carbonosos da Formação Paracatu, fácies Morro do Ouro. É de grande importância econômica por conter um depósito de ouro gigante, com aproximadamente 300 milhões de toneladas de minério e um teor da ordem de 0,44 gramas por tonelada, classificando-a como a mina de mais baixo teor do mundo explorada economicamente (Costa Junior, 1997).

A viabilidade econômica desse depósito, segundo Costa Junior (1997), é devida principalmente à ação de processos exógenos que atuaram na região, condicionados aos fatores lito-estruturais, que permitiram o amplo desenvolvimento do saprolito fino, que é o próprio minério. Todos os dados geoquímicos e mineralógicos mostram que o intemperismo

atuante no Morro do Ouro é imaturo, com pouca geração de caolinita e basicamente transformação de muscovita em illita.

Meneses *et al.* (2001) realizaram medições dos espectros de fator de reflectância bidirecional (0,4 a 2,5  $\mu\text{m}$ ) de dez amostras de filitos carbonosos de áreas mineralizadas de ouro da mina Morro do Ouro, utilizando um espectrômetro de reflectância de alta resolução, e encontraram que estes minérios 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 de minério. Os minerais traço presentes são o rutilo, a galena, a esfalerita, a ilmenita, a goethita, a pirita e a arsenopirita. A matéria carbonosa apresenta em média um valor de 2,5%.

Costa Junior (1997) faz uma descrição da desestabilização dos minerais que promovem o aumento na concentração de ouro no minério em função da evolução do perfil de intemperismo, dando origem, segundo a classificação geometalúrgica, a sete tipos distintos de minérios (T1 a T7), que podem ser resumidos com a seguinte seqüência de evolução. O minério menos intemperizado e com os menores teores de ouro é denominado de T4. Com a evolução do intemperismo, começam a se desestabilizar alguns minerais como a muscovita, a siderita, a albita e os sulfetos, formando principalmente illita. Isto promove um aumento na concentração de ouro e a recuperação metálica é boa. Os minérios que apresentam estas características são denominados de T1, T2 e T3. Com o avanço do intemperismo, o processo continua concentrando ouro, mas aparecem os argilo-minerais do grupo da caolinita e a recuperação cai. Este minério é denominado de T6.

Segundo Costa Junior (1997), os minérios T1, T2 e T3 apresentam-se com uma mineralogia bem similar do ponto de vista da sua composição modal, sendo, em média, quase invariável em relação aos dois principais minerais (mica branca e quartzo). A quantidade de minerais acessórios diminui do T1 ao T3, à exceção do mineral anatásio. T4 é distinto, contendo uma proporção de rocha fresca mais elevada, possuindo maiores concentrações de albita e siderita e baixas concentrações de clorita. De acordo com os parâmetros estabelecidos pela geometalurgia, T5 inexistente na área de lavra atual. O minério T6 caracteriza-se por um comportamento geometalúrgico problemático, com baixa taxa de recuperação metálica na



planta de beneficiamento. Pelos altos valores de illita e caolinita que contém, é o mais intemperizado, sendo este um critério de identificação deste tipo. O minério T7 é pouco representativo no depósito e possui características mineralógicas e químicas intermediárias entre T1 e T4.

Na mina Morro do Ouro, o ouro presente nos horizontes do perfil de intemperismo ocorre disseminado, concentrando-se principalmente nos *boudins* de quartzo e no filito intemperizado, onde atinge teores de até 3,0 g/t. Mostra uma granulometria que varia de 5 a 500 micras, com diâmetro médio dos grãos de cerca de 15 micras, raramente visível a olho nu. Normalmente contém prata, formando uma liga metálica, com valores médios em torno de 74% de ouro e 26% de prata (porcentagem atômica) (Costa Júnior, 1997).

### **2.3 LIQUEFAÇÃO DE REJEITOS**

Na terminologia geotécnica o termo liquefação tem sido utilizado em diferentes épocas para a descrição de fenômenos diferentes. Inicialmente era usado para indicar a ruptura do pé de um depósito causada pela saída de fluxo de água a um gradiente hidráulico elevado (maior que o gradiente hidráulico crítico). Posteriormente foi empregado para definir o incremento do excesso de poro-pressão em uma areia saturada devido às aplicações repetidas de ciclos de esforços cortantes não drenados. Atualmente é utilizado também para se referir à perda de resistência em areias finas, fofas e saturadas por um incremento monotônico de esforços de cisalhamento não drenado (Castro, 1969; Kramer, 1985; Poulos *et al.*, 1985).

Com o estudo deste fenômeno foi possível identificar os fatores que influenciam o potencial de liquefação em depósitos submetidos a carregamentos cíclicos ou monotônicos (Castro, 1969; Vaid & Finn, 1979; Kramer, 1985; Boulanger & Seed, 1995; Polito & Martin, 2001; Youd & Idriss, 2001 e Finn, 2002). Estes fatores são:

- Densidade relativa;
- Pressão de confinamento;
- Tensão de cisalhamento inicial;
- Estrutura granular do depósito;
- Angularidade das partículas;
- Relação de sobre-adensamento;

- Intensidade e tempo dos carregamentos;
- História de tensões prévias.

Kramer (1985) analisou o processo de cisalhamento em amostras de rejeito, em ensaios triaxiais estáticos, com a finalidade de avaliar o potencial de liquefação. As amostras devem ser adensadas até um estado de tensões representativo das condições de campo. Este estado de tensões induz na amostra uma tensão cisalhante inicial ao processo de falha. Posteriormente, é iniciado o processo de ruptura até atingir a resistência máxima da amostra, antes da liquefação. Imediatamente após a liquefação a resistência diminui e a poro-pressão continua aumentando até se estabilizar em uma grande deformação, onde a amostra atinge a resistência residual. O autor também explora o efeito do confinamento, da densidade relativa e do esforço cisalhante inicial no comportamento da liquefação do material.

Um outro aspecto que tem sido muito pouco estudado no Brasil é o comportamento dos rejeitos sob cargas estáticas e dinâmicas que induzem nos depósitos comportamentos particulares como liquefação ou cisalhamento sob condições não drenadas. Gumieri *et al.* (1995) apresentaram um estudo do potencial de liquefação de rejeitos de mineração de ferro no qual se analisa a possibilidade de ocorrência de liquefação sob a ação de carga estática, considerando os resultados de ensaios triaxiais realizados em corpos de prova de material de rejeito. Mais recentemente, Gomes *et al.* (2002) e Pereira (2004) utilizaram metodologias similares para a avaliação do potencial de liquefação. Um estudo de como a variabilidade dos parâmetros geotécnicos pode afetar a estabilidade das obras com relação ao potencial de liquefação é apresentado por Espósito *et al.* (2000). No âmbito internacional, alguns trabalhos têm sido apresentados no sentido de cobrir esta lacuna do conhecimento. Ulrich & Fourie (2003) estudaram o potencial de liquefação de barragens de rejeito devido à ação de uma carga monotônica. O estudo foi realizado através da execução de ensaios de campo e laboratório.

Tibana *et al.* (1998) estudaram as características de resistência não drenada de um resíduo de mineração de ferro sob a ação de carregamentos monotônicos, cíclicos e a diferentes trajetórias de tensões durante o processo de cisalhamento, de diferentes corpos de prova moldados em laboratório.

Em geral, diferentes trabalhos têm expressado a necessidade de estudar e aprofundar no entendimento de como os rejeitos de minério de ferro se comportam nestas condições de solicitação. Entre estes trabalhos destacam-se os apresentados por Busch *et al.* (1999), Espósito (2000), Gomes *et al.* (2002) e Pereira (2004). Esta necessidade tem sido ratificada em algumas das recentes rupturas de barragens de rejeito de minério de ferro no estado de Minas Gerais, que têm custado vidas humanas e têm imposto um elevado custo ambiental, econômico e social.

## **2.4 ENSAIOS DE SIMULAÇÃO DE DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA**

Segundo Ribeiro (2000), os ensaios de deposição hidráulica representam uma importante ferramenta na avaliação das propriedades dos aterros hidráulicos. No entanto, existem algumas limitações e dificuldades associadas à obtenção dos fatores de escala relacionados aos fenômenos hidráulicos que envolvem o transporte de sedimentos. Um fator limitante é vinculado à simulação do tamanho das partículas, pois sua representação em escala atinge limites nos quais ela se torna demasiadamente fina de modo que as forças coesivas são induzidas, podendo invalidar os modelos (Sharp, 1981 e Gomes, 1993). Esse autor acrescenta que existem também limites práticos para parâmetros variáveis como densidade e viscosidade do fluido, além da densidade do sedimento e o próprio regime de escoamento. Entretanto, uma aproximação lógica da escala real para os testes de laboratório pode ser feita usando os conceitos de modelagem hidráulica (Yalin, 1971 e Sharp, 1981) ou utilizando o processo da semelhança (Hooke, 1968).

O conceito de modelagem hidráulica é uma aproximação direta que fornece uma base para a geração de hipóteses e que pode revelar novas informações a respeito dos processos e tendências de comportamento, associadas a conclusões qualitativas extraídas do sistema experimental aplicadas ao sistema de campo. Esta forma de aproximação é bem adaptada ao estudo dos mecanismos de deposição hidráulica em que o interesse está em investigar os conceitos gerais relevantes aos aterros hidráulicos e não um caso em particular. É baseado neste princípio que a maioria dos ensaios de simulação de deposição hidráulica tem sido proposta e as análises realizadas apresentam geralmente um caráter puramente qualitativo.

Inúmeros ensaios de simulação de deposição hidráulica são reportados na literatura envolvendo fluxo de água e sedimentos. Muitos destes ensaios são destinados ao estudo da

resistência de fluxo, taxas de transporte de sedimentos e estratificação de depósitos para condições específicas de fluxo e sedimentos dentro de um contexto sedimentológico ou hidrodinâmico. Um pequeno número de ensaios foi desenvolvido para estudos específicos de comportamento de aterros hidráulicos enfatizando aspectos geotécnicos (Ferreira *et al.*, 1980; Blight *et al.*, 1985; De Groot *et al.*, 1988; Fan & Masliyah, 1990; Küpper *et al.*, 1992a; Küpper *et al.*, 1992b e Ribeiro, 2000). A maioria dos equipamentos existentes apresenta propostas semelhantes, diferindo apenas na concepção de projeto e arranjo físico. Entretanto, o controle das variáveis que afetam o processo é similar durante a execução do ensaio.

A maioria destes ensaios representa uma avaliação global do processo de deposição hidráulica. Grande parte dos estudos está relacionada com a previsão do talude de equilíbrio para uma condição específica de fluxo. Outra porcentagem apresenta resultados relevantes às características físicas e mecânicas dos aterros formados. As principais diferenças encontram-se relacionadas ao arranjo físico e às características do sistema de alimentação e descarga.

No Brasil, um equipamento foi construído com o objetivo de auxiliar os estudos de viabilidade do projeto e construção da Barragem de Porto Primavera, inicialmente projetada para ser construída com a técnica de aterro hidráulico. Os estudos de laboratório, apresentados por Ferreira *et al.* (1980), seguiram a metodologia e a norma soviética, baseada principalmente na adoção de ensaios de simulação de deposição hidráulica em laboratório para avaliar as potencialidades e características do material disponível quando aplicada a técnica da hidromecanização. Este procedimento foi extensivamente utilizado pelos soviéticos até a consolidação do método e o estabelecimento de tecnologias e normas de construção. Com a normalização e utilização em larga escala do processo de hidromecanização, os ensaios de laboratório passaram a ter um uso restrito na rotina soviética, mas foram largamente utilizados na fase inicial de implantação da técnica (Filimonov, 1979).

No Canadá, reporta-se na literatura a construção de três equipamentos para a realização de ensaios de deposição hidráulica. O primeiro foi desenvolvido com o objetivo de realizar ensaios para a obtenção de dados para o projeto da barragem de rejeitos de East Kemptville, Nova Scotia. Uma série de ensaios foi realizada com diferentes inclinações no canal de simulação e diferentes concentrações. Contudo, Küpper *et al.* (1992b) relatam que somente os dados referentes às distribuições granulométricas do material grosso utilizado no ensaio foram disponibilizados. Estes dados são relativos a dois ensaios realizados com valores de

concentração de 20 a 40%. Infelizmente, não existem referências sobre valores da vazão utilizada e nem sobre os procedimentos de ensaios.

No Departamento de Química da Universidade de Alberta, foi estudada a variação do perfil de praias de aterro hidráulico em função do tempo e da distância ao ponto de descarga para diferentes valores de concentração e vazão de descarga (Fan & Masliyah, 1990). As características do equipamento são descritas por Fan & Masliyah (1990). Os dados obtidos pelos autores foram utilizados de forma sistemática nas formulações matemáticas para a determinação do perfil baseado nos diferentes parâmetros de descarga. Fan & Masliyah (1990) relatam a influência da concentração da mistura na inclinação do talude e, principalmente, na velocidade de crescimento do depósito. Embora as variações nas vazões de fluxo tenham apresentado pouca influência na inclinação do talude, seu efeito foi considerável na velocidade de evolução do depósito.

No Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Alberta, foi realizado um intenso programa experimental envolvendo simulações de campo e laboratório. Os resultados destes ensaios são apresentados por Küpper et al. (1992a, 1992b) e tinham por objetivo avaliar a influência dos parâmetros de descarga no comportamento de depósitos construídos hidráulicamente. Para isto Küpper et al. (1992a) avaliaram o comportamento de três materiais diferentes, sendo duas areias comercializadas na região e o terceiro material foi o rejeito proveniente da Mina Syncrude. Os principais parâmetros analisados estão relacionados com as características granulométricas do material empregado, vazão de descarga e concentração da mistura. Uma das maiores contribuições deste trabalho é a avaliação da representatividade dos ensaios de laboratório ao serem estes comparados com as simulações de campo.

Na Universidade de Witwatersrand na África do Sul, foram realizados ensaios de deposição hidráulica que tinham por objetivo estudar o conceito do perfil típico proposto por Melent'EV *et al.* (1973), citado por Ribeiro (2000). Estes estudos são apresentados por Blight (1994) que mostra que os ensaios foram realizados em diferentes tipos de rejeitos de mineração, entre eles rejeitos de ouro, cobre, bauxita e carvão, e foram adotados valores de concentração variando entre 50 e 70%. As conclusões apresentadas por Blight (1994) revelam a dificuldade de se entender completamente o perfil típico dos depósitos, mas consideram que o perfil obtido é fundamentalmente influenciado pela concentração, distribuição granulométrica e características do processo de deposição.

Na Holanda, mais especificamente em Delft, foi desenvolvido um programa experimental e teórico associado ao estudo do comportamento dos diques de contenção construídos na parte sudeste da Holanda. A maioria destas estruturas está relacionada às pequenas barragens para contenção de cheias cuja técnica construtiva empregada tem sido a técnica de aterros hidráulicos (De Groot *et al.*, 1988; Winterwerp *et al.*, 1990 e Winterwerp *et al.*, 1992). As análises realizadas têm por objetivo básico otimizar o processo construtivo destas estruturas e melhorar a qualidade da metodologia construtiva empregada.

Nos Estados Unidos, no *Bureau of Mines Research Center*, foram realizados ensaios de deposição hidráulica utilizando rejeitos de cobre e prata, e de uma mineração mista de cobre, prata e chumbo. Os ensaios tinham por objetivo avaliar as condições geométricas das praias, assim como as propriedades geotécnicas de resistência, permeabilidade e granulometria dos depósitos obtidos (Boldt, 1988 citado por Küpper *et al.*, 1992a).

Na Universidade de Queensland, na Austrália, foram realizados ensaios de deposição hidráulica nos quais foi realizada a determinação do perfil típico associado a cada tipo de material estudado. O objetivo principal destes estudos era a caracterização dos depósitos de rejeito, visando avaliar sua capacidade de armazenamento, geometria, área de estocagem de rejeito e vida útil das barragens, e desta forma otimizar o processo construtivo e aumentar a qualidade destes projetos (Fourie, 1988). Fourie (1988) considera que a caracterização da geometria do depósito, relacionada ao tipo específico de rejeito, é um fator importante nos projetos e na construção de barragens de rejeito. Entretanto, o autor ressalta as dificuldades em se obter estes parâmetros na fase inicial dos projetos, devido principalmente à falta de conhecimento do comportamento do material quando submetido ao processo de deposição hidráulica. Desta forma, ressalta a aplicabilidade das simulações de laboratório como uma forma importante na obtenção dos parâmetros geométricos do depósito.

Ribeiro (2000) apresenta uma discussão mais profunda dos diferentes ensaios de deposição apresentados na literatura, estuda os resultados obtidos e avalia as condições de cada um dos equipamentos construídos, assim como suas limitações e vantagens.

## 2.5 MÉTODOS GEOFÍSICOS

Os métodos geofísicos têm adquirido uma importante posição dentro das técnicas de investigação da engenharia civil moderna. A maior área de influência dos projetos de engenharia tem obrigado a realização de generalizações das informações adquiridas com as perfurações mecânicas, de elevado tempo de execução e custo. Com os avanços na eletroeletrônica, tornou-se possível o desenvolvimento de técnicas e ferramentas de análise que permitem a interpretação e complementação de dados pontuais em uma grande área de influência dos projetos de engenharia. Desta forma, uma avaliação das condições de deposição em alguns pontos da praia, em conjunto com os métodos geofísicos, permitirá a realização de um diagnóstico das condições gerais dos depósitos obtidos.

Existem vários métodos geofísicos que têm aplicações específicas na geotecnia, entre estes se podem destacar a Resistividade Elétrica, a Propagação de Onda Sonora e a Gravimetria.

A Resistividade Elétrica é a resistência que uma massa de solo ou de rocha opõe à passagem de uma corrente elétrica. A resistividade ou resistência específica ( $\rho$ ) é uma propriedade dos corpos por meio da qual estes se contrapõem ao avanço da corrente elétrica. A resistividade se relaciona com a resistência elétrica (R) mediante a seguinte equação:

$$R = \rho \left( \frac{L}{A} \right) \quad (2.1)$$

onde:

R : Resistência;

$\rho$  : Resistividade elétrica;

L : Comprimento do condutor;

A : Área da seção transversal.

O inverso da resistividade é o que se conhece como a Condutividade Elétrica ( $1/\rho$ ). A faixa de variação da resistividade para os materiais geotécnicos está entre  $10^{-2}$  a  $10^{-5} \Omega.m$  (Ohm x m). A resistividade apresenta uma forte dependência tanto das mudanças de temperatura como da proporção de elementos metálicos presentes na massa de solo ou da rocha (Sarria, 1996).

Outro elemento que influencia notavelmente a resistividade é a água presente nos poros de um meio contínuo. Desta forma, a resistividade de um solo ou de uma rocha é função do grau de saturação e da salinidade da água freática, ou seja, da concentração iônica, da mobilidade eletroquímica dos íons e da temperatura. Nos estudos de resistividade, a salinidade se expressa como o volume total de sólidos em dissolução ( $V_{SD}$ ). Em ambientes naturais a resistividade da água ( $\rho_w$ ) varia entre 0,1  $\Omega.m$  para lagos salgados e 300  $\Omega.m$  para água pura destilada.

A quantidade de água presente em uma massa saturada depende de sua porosidade; desta forma, a resistividade da massa saturada depende da resistividade da água de saturação ( $\rho_w$ ) (Sarria, 1996). A resistividade da massa saturada ( $\rho_o$ ) pode ser expressa em função da resistividade da água ( $\rho_w$ ) e do Fator de Formação da massa ( $F_f$ ) como apresentado:

$$\rho_o = F_f \cdot \rho_w \quad (2.2)$$

O Fator de Formação ( $F_f$ ) é, portanto, a relação entre a condutividade do fluido que preenche os poros e a resistividade do mesmo meio saturado. O Fator de Formação da Equação 2.2 relaciona a estrutura interna do meio percorrido pela corrente elétrica com a resistividade que o meio lhe impõe. Desta forma, os fatores que afetam o  $F_f$  são:

- A forma dos grãos;
- A granulometria do meio;
- A disposição dos grãos (estrutura granular: porosidade ou índice de vazios);
- O conteúdo de metais ou grãos metálicos.

Para os materiais arenosos de quartzo, com porosidades variando entre 36 e 50%, o valor do Fator de Formação tem sido estimado entre 3,0 e 3,9 (Sarria, 1996).

## **2.6 CONGELAMENTO DE SOLOS GRANULARES**

Durante anos, o fenômeno de congelamento de solos e amostras tem sido estudado visando à resolução de problemas, tanto na coleta como na moldagem de amostras de solos, assim como uma alternativa para a solução de problemas de engenharia. No entanto, as leis da física ditam que quando a água é congelada esta apresenta uma expansão volumétrica que pode chegar a



3%. Um melhor entendimento do fenômeno de congelamento permitirá a elaboração de uma técnica de amostragem de materiais granulares que altere as amostras o menos possível, permitindo a obtenção de parâmetros mais representativos.

Durante o processo de congelamento quando um solo contém água, a expansão observada é, neste caso, geralmente a expansão resultante do congelamento da água contida no solo. Este fenômeno é chamado de “frost heave” e para este tipo de solo é definida a susceptibilidade ao congelamento. Este tipo de caso pode apresentar um grande incremento de volume se o suprimento de água é ilimitado, como é o caso de solos com o nível freático próximo da frente de congelamento (Kinosita, 1979).

Neste caso o fenômeno ocorre devido ao fato de que a água na parte não congelada do solo tende a se movimentar na direção da frente de congelamento, onde é retida na forma de lentes de gelo. A movimentação da água através da frente de congelamento é representada na Figura 2.4 onde são apresentados os componentes do fluxo de água em uma seção de solo congelada no topo e descongelada na base.

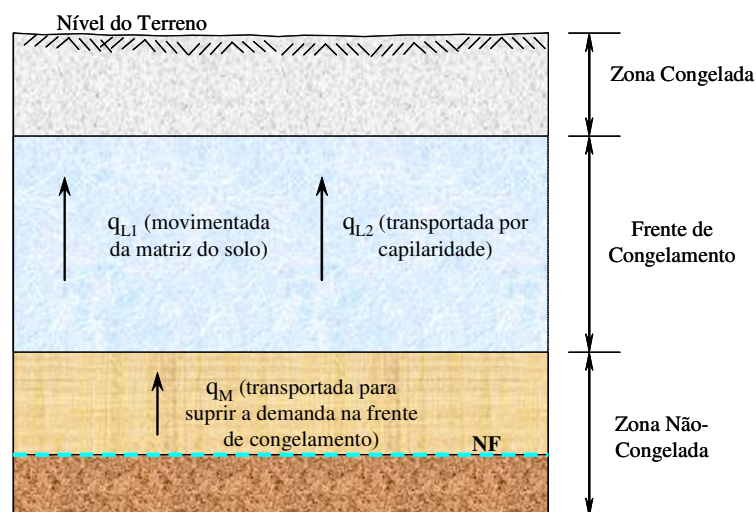
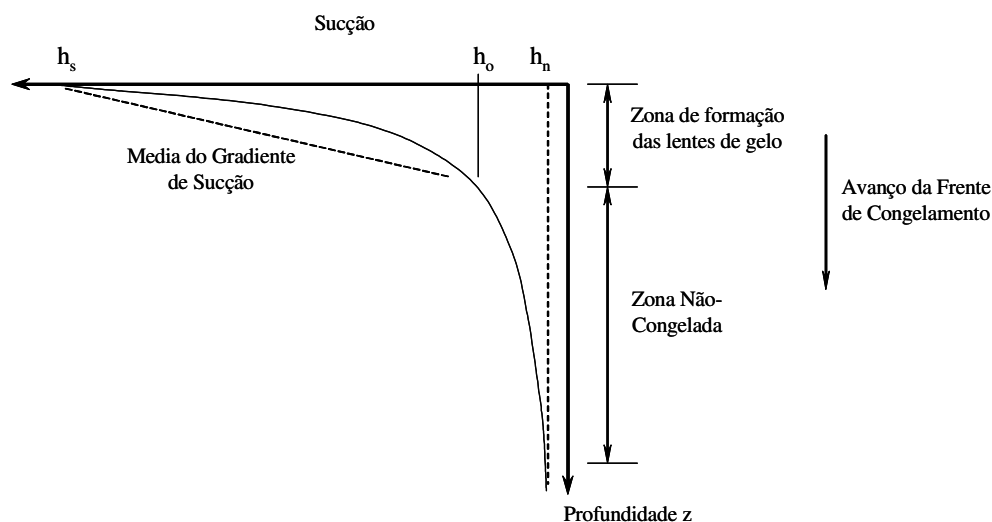


Figura 2.4 Vazões de movimentação da água para uma seção de solo congelada no topo (modificado – Jones, 1995)

Os incrementos no volume de água induzem esforços na massa de solo gerando o fenômeno de expansividade. Se o congelamento se dá homoganeamente em todas as direções, a direção da expansão será a do menor esforço de confinamento. Se o congelamento apresenta uma

frente de avanço (ou frente de congelamento), como se apresenta normalmente nas regiões temperadas, o sentido da expansão será perpendicular à frente de congelamento.

A movimentação da água durante o processo de congelamento é explicada pelo estreitamento dos vazios, devido à formação de lentes de gelo, que induzem no solo o acréscimo de sucção. A Figura 2.5 apresenta a variação da sucção ao longo de um perfil de solo devido ao avanço da frente de congelamento. Na Figura 2.6 é observado um esquema em duas dimensões do processo de congelamento de areias. Neste gráfico, pode-se observar que o aumento na sucção do solo faz com que, durante o processo de congelamento, um gradiente de fluxo seja induzido no sentido da frente de congelamento, alimentando com mais água a formação de novas lentes de gelo, aumentando, ainda mais, a expansividade da massa de solo.



- $h_n$  : sucção da massa de solo não congelada
- $h_o$  : sucção na borda da frente de congelamento
- $h_s$  : sucção da massa de solo congelada

Figura 2.5 Variação da sucção na massa de solo devida ao avanço da frente de congelamento  
(modificado – Jones, 1995)

Os efeitos do processo de expansão durante o congelamento e posterior retração das amostras de solo no descongelamento têm sido intensamente estudados e apresentados na literatura. Yoshimi & Goto (1996) discutem a resistência à liquefação de areias siltosas baseados na obtenção de amostras congeladas. Como resultado parcial de seu trabalho, os autores mostram que o conteúdo de finos influencia diretamente o grau de expansividade das areias saturadas. Areias com um conteúdo de finos da ordem de 5% apresentam um incremento médio de

volume de 1,0%. Por outro lado, areias com até 20% de finos apresentam incremento de volume, durante o processo de congelamento, de 3,5%, com valores que podem chegar a 4,0%. Em geral, os autores encontraram que a relação entre o incremento de volume durante o congelamento e o decréscimo de volume na fase de descongelamento é aproximadamente igual.

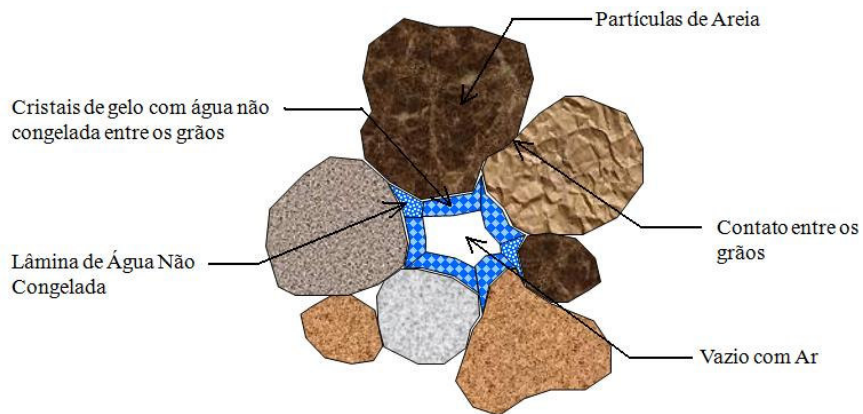


Figura 2.6 Esquema em duas dimensões do processo de congelamento de areias  
(modificado – Ting *et al.*, 1983)

## **CAPÍTULO 3**

### **3. ENSAIOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA, CONGELAMENTO E DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA DE REJEITOS**

Durante o tempo de duração da pesquisa, foram desenvolvidas atividades que objetivaram atingir as metas propostas. Neste sentido são apresentadas e discutidas as metodologias utilizadas no desenvolvimento da pesquisa, assim como os passos dados para a solução de diferentes problemas enfrentados.

Como apresentado no capítulo anterior, o primeiro passo foi ampliar a revisão bibliográfica visando identificar o estado de conhecimento do comportamento dos principais elementos que incidem no processo de deposição do rejeito. Dentro destes elementos, destacam-se a natureza do processo de mineração do ferro, os processos e mecanismos de transporte e deposição de lamas e resíduos de mineração, os processos de deposição hidráulica, as particularidades e propriedades geotécnicas dos resíduos de mineração de ferro depositados na forma de lama, a modelagem do comportamento de barragens de rejeito, e outros elementos que, de uma forma ou de outra, influenciam as propriedades dos rejeitos hidraulicamente depositados. Estes e outros elementos foram cuidadosamente estudados e apresentados anteriormente.

Igualmente foi pesquisada a incidência do processo de congelamento de solos granulares na integridade das amostras obtidas com o emprego desta técnica, assim como a técnica de condutividade elétrica, fundamental para o entendimento do comportamento elétrico do material de rejeito.

### 3.1 RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Nesta pesquisa foi elaborada uma metodologia para a determinação do parâmetro Fator de Formação ( $F_f$ ) em rejeitos de minério de ferro. O estudo do Fator de Formação permitiu uma avaliação da influência do conteúdo de ferro presente nos rejeitos com relação a sua resistividade. Desta forma, por meio de uma calibração prévia, poderá ser inferido o teor de ferro presente no rejeito de minério de ferro com a estimativa do Fator de Formação da massa de rejeito.

A resistividade elétrica foi determinada em dispositivo geométrico, medindo-se a queda de potencial entre dois eletrodos, entre os quais flui uma corrente com intensidade  $I$ . O sistema consta de dois eletrodos de corrente (A e B) e dois eletrodos de potência (M e N), como pode ser observado na Figura 3.1. Adicionalmente, tem-se um miliamperímetro que permite a regulagem da intensidade  $I$  e um milivoltímetro que possibilita a determinação da queda de tensão  $\Delta V$ .

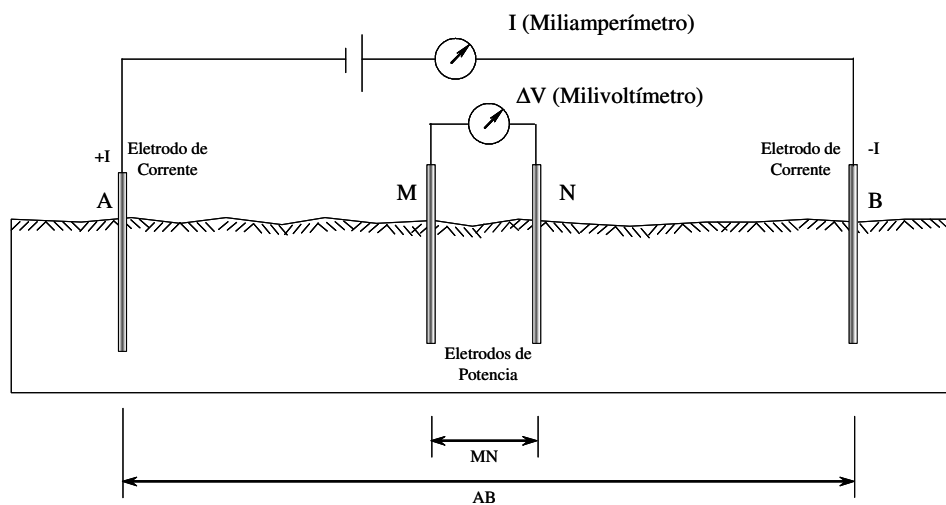


Figura 3.1 Elementos de um dispositivo geométrico

Para a presente pesquisa, foi construído um dispositivo geométrico que pode ser facilmente instalado no ESDH. O equipamento consta de um gerador de frequência marca *BK Precision Serie 4010A 2MHz*, um milivoltímetro digital MS8205, quatro eletrodos de 100 mm de comprimento e 2,75 mm de diâmetro, com espaçamento AB de 300 mm e MN de 60 mm. O sistema de eletrodos de espaçamento fixo foi montado em uma placa de madeira que pode ser

facilmente acoplada ao carrinho que permite a movimentação dentro do ESDH. Os eletrodos foram ligados aos equipamentos de indução e medição por meio de um cabo de quatro fios, com um comprimento de 7,0 m, dotados de plugues, tipo jacaré, que facilitam a montagem do sistema. Este arranjo facilita a movimentação dos eletrodos ao longo da praia, permitindo que os equipamentos permaneçam num local fixo.

Para a calibração do equipamento geoeletrico, foi construída uma caixa de madeira de 150 mm × 150 mm × 400 mm na qual foi realizada a compactação do material de rejeito em condições controladas de índice de vazios, saturação e teor de ferro. Para esta calibração foi, então, necessária a classificação do material de rejeito, com o objetivo de realizar a medição de resistividade em materiais com teores de ferro diferentes. Foram assim classificados 30 kg de rejeito utilizando a técnica apresentada por Hernandez (2002) para a obtenção do material necessário para o preenchimento da caixa de madeira, em diferentes condições de porosidade e saturação.

Com este procedimento foram obtidos dois materiais, um concentrado de Quartzo, denominado de Material Q, e um concentrado de Ferro, chamado de Material Fe. Na Tabela 3.1 são apresentadas as principais características geotécnicas destes materiais como massa específica dos grãos e granulometria, entre outras.

Para a obtenção de uma ampla faixa de valores de resistividade em função do índice de vazios e do grau de saturação, os dois materiais foram compactados com quatro índices de vazios diferentes e, para cada um destes, foram moldadas amostras com cinco diferentes graus de saturação. Na Tabela 3.2 estão referenciados os índices de vazios e os diferentes graus de saturação empregados para cada material.

O controle da densidade necessária para atingir a porosidade desejada foi realizado por meio da determinação da massa de material úmido e da massa de material seco necessárias para o preenchimento do volume da caixa de madeira. Esta determinação foi realizada utilizando a seguinte equação:

Tabela 3.1 Propriedades geotécnicas dos materiais concentrado de quartzo (Material Q) e concentrado de ferro (Material Fe)

Propriedade	Unidade	Material Q	Material Fe
Peso específico dos grãos ( $\gamma_s$ )	kN/m <sup>3</sup>	26,9	46,0
Conteúdo de Ferro (Fe)	%	1,5	75,0
Óxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	%	98,5	25,0
Índice de vazios máximo ( $e_{m\acute{a}x}$ )	-	0,92	1,06
Índice de vazios mínimo ( $e_{m\grave{i}n}$ )	-	0,61	0,66
Porosidade máxima ( $n_{m\acute{a}x}$ )	%	48	51
Porosidade mínima ( $n_{m\grave{i}n}$ )	%	38	40
Diâmetro efetivo ( $D_{10}$ )	mm	0,114	0,062
Diâmetro médio ( $D_{50}$ )	mm	0,268	0,237
$D_{60}$	mm	0,316	0,299
$D_{90}$	mm	0,616	0,626
Coefficiente de Uniformidade (CU)	-	2,8	4,8
$D_{90} / D_{10}$	-	5,4	10,1

Tabela 3.2 Propriedades de moldagem dos materiais para a realização do ensaio de condutividade elétrica

Material Q			Material Fe		
e	n (%)	S (%)	e	n (%)	S (%)
0,923	48	0,17; 25; 50; 75; 90 e 100	1,041	51	0,5; 25; 50; 75; 90 e 100
0,818	45	0,2; 25; 50; 75; 90 e 100	0,887	47	0,57; 25; 50; 75; 90 e 100
0,695	41	0,23; 25; 50; 75; 90 e 100	0,754	43	0,67; 25; 50; 75; 90 e 100
0,613	38	0,26; 25; 50; 75; 90 e 100	0,667	40	0,76; 25; 50; 75; 90 e 100

$$M = \frac{V \times \rho_s}{1 + e} \times (1 + w) \quad (3.1)$$

onde:

- M Massa úmida;  
V Volume da amostra;  
 $\rho_s$  Massa específica dos grãos;

e Índice de vazios;  
w Umidade higroscópica;

Adicionalmente, utilizando a expressão 3.2, foi determinado o volume de água necessário para atingir o grau de saturação desejado, em função da umidade higroscópica do material.

$$V_w = \frac{S \times e \times M_d}{\rho_s} - \frac{w \times M_d}{\gamma_w} \quad (3.2)$$

onde:

M Massa úmida;  
V Volume da amostra;  
 $\rho_s$  Massa específica dos grãos;  
e Índice de vazios;  
w Umidade higroscópica;  
 $\gamma_w$  Densidade da água;  
S Grau de saturação.

A Equação 3.1 permite determinar a massa de solo  $M$  necessária para o preenchimento de um volume  $V$ , com um índice de vazios  $e$ , para um solo que apresenta uma massa específica dos grãos  $\rho_s$  e uma umidade  $w$ . A Equação 3.2 fornece o volume de água necessário para que uma amostra de solo de massa  $M$ , massa específica dos grãos  $\rho_s$ , e umidade higroscópica  $w$ , ao ser compactada a um índice de vazios  $e$ , apresente um dado grau de saturação  $S$ .

Utilizando a metodologia apresentada por Daniel (1997) foi realizada a análise dos dados obtidos da realização dos ensaios de resistividade. Inicialmente, foi determinado o Fator de Forma ( $F$ ) para os ensaios realizados, seguido pela determinação do coeficiente  $m$  que relaciona o fator  $F$  com a porosidade, para o caso do material saturado ( $S \approx 100\%$ ). Posteriormente é determinado o coeficiente  $s$ , que relaciona as mudanças do produto  $F \times n^{-m}$  com as variações na saturação  $e$ , finalmente, foi avaliada a variação do fator  $F$  com as mudanças no conteúdo de ferro do material.

### 3.2 CONGELAMENTO DE SOLOS GRANULARES

O processo de congelamento altera a estrutura dos solos como foi discutido no Capítulo 2. No entanto, este procedimento pode ser uma alternativa viável para a realização da moldagem de



corpos de prova de materiais de rejeito que apresentam granulometria de areia. A técnica de congelamento pode igualmente ser utilizada para a obtenção de amostras inalteradas que possam ser manipuladas para a realização de ensaios triaxiais, ou de cisalhamento direto, permitindo uma melhor avaliação das condições de resistência destes materiais.

Para o emprego desta técnica deve ser, então, avaliada a sua influência em amostras de rejeito, tentando identificar a ponderação dos elementos que influenciam na alteração dos corpos de prova. Da literatura é sabido que a expansibilidade dos solos congelados é influenciada pelo conteúdo de finos, o índice de vazios inicial, o grau de saturação, o confinamento, o estado de tensões e a disponibilidade de uma fonte de água como a proximidade do nível freático ou água superficial.

Objetivando a avaliação do processo de congelamento em amostras moldadas em laboratório, foi idealizado um ensaio de congelamento em amostras moldadas em cilindros metálicos de parede grossa. Foram moldados doze cilindros com porcentagens de saturação que variaram entre 5 e 100% para o material de rejeito de minério de ferro, que apresenta um peso específico dos grãos de  $33,4 \text{ kN/m}^3$ . As amostras foram moldadas para um índice de vazios próximo do máximo do material; neste caso, foi utilizado um índice de vazios de 0,818 que corresponde a uma porosidade de 45%. Este índice de vazios foi escolhido devido ao fato de que amostras com alto índice de vazios apresentam poros maiores e, por conseguinte, um tempo de congelamento maior. Adicionalmente, amostras com um alto índice de vazios apresentam uma maior possibilidade de expansão devido ao congelamento da água presente nos poros.

### **3.3 ENSAIOS DE DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA (ESDH)**

Com a finalidade de obter os dados de deposição necessários para o desenvolvimento da pesquisa, foi realizada a manutenção do equipamento de simulação de deposição hidráulica (ESDH), desenvolvido por Ribeiro (2000), modificando a válvula de descarga de modo a permitindo, assim, um melhor controle da vazão durante o ensaio. Adicionalmente, foram implementadas rotinas, durante a realização dos ensaios, que permitiram um monitoramento mais detalhado do processo de deposição hidráulica. Nestes novos ensaios foram realizadas medições periódicas da vazão durante o tempo de duração do ensaio, sendo tomadas, em

média, treze amostras, durante a realização do ensaio, para a confirmação da concentração real de descarga e foram obtidas informações fundamentais como a variação da altura da crista durante o andamento do ensaio. Após a conclusão do ensaio, foi realizada a determinação de um perfil de permeabilidade ao longo do comprimento da praia, a determinação do perfil da praia ao longo de três eixos longitudinais e a espaçamentos de 100 mm. Também foi realizada a coleta de amostras inalteradas das praias de rejeito, que permitiram a determinação de parâmetros como densidade, índice de vazios, umidade natural após 24 h do fim do processo de deposição, entre outros.

### 3.3.1 Equipamento de Simulação de Deposição Hidráulica (ESDH)

O equipamento de ESDH, desenvolvido por Ribeiro (2000), consiste basicamente de três partes fundamentais que funcionam de forma integrada durante todo o período de realização dos ensaios, provendo a manutenção dos parâmetros de fluxo e as condições necessárias para um processo controlado de deposição hidráulica. A parte principal do equipamento consiste de um canal de deposição, onde são realizadas as simulações das diferentes variáveis de descarga e onde ocorre a formação do depósito. Integrado ao canal, encontra-se um sistema de alimentação acoplado a um sistema de controle de descarga. A Figura 3.2 apresenta um esquema do equipamento de ESDH.

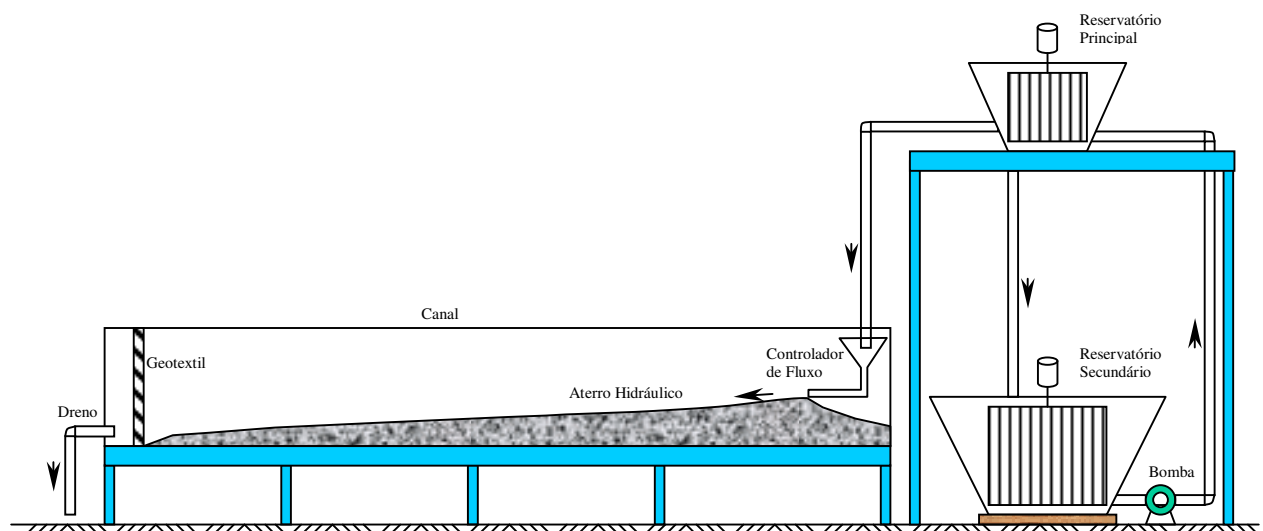


Figura 3.2 Esquema do Equipamento de Simulação de Deposição Hidráulica (ESDH)  
(modificado Ribeiro, 2000)

O canal de deposição tem 6,0 m de comprimento, 0,40 m de largura e 1,0 m de altura. O canal foi construído usando perfis metálicos, que sustentam as paredes laterais de vidro temperado, capazes de suportar o empuxo provocado pelo material depositado. Este tipo de parede permite a visualização do processo de deposição ao longo de toda a extensão do canal.

O sistema de alimentação consiste de dois reservatórios; um principal, localizado na parte superior do canal, e um secundário, localizado ao lado do equipamento onde é feita a preparação da mistura. Os dois reservatórios são integrados por meio de uma bomba especial para sólidos que mantém a recirculação da mistura durante todo o período de realização do ensaio. O nível do reservatório superior é mantido constante através de sistemas de saída localizados em diferentes pontos ao longo da profundidade do reservatório. Um sistema de pás metálicas vazadas, com seção levemente inferior ao diâmetro dos reservatórios, agita a mistura e permite manter a concentração homogênea durante o período de realização do ensaio (Ribeiro, 2000).

A descarga da lama dentro do canal é feita através de um controlador de fluxo projetado para produzir uma condição de fluxo uniforme ao longo do canal pelo direcionamento do fluxo sempre paralelo às paredes do canal. O objetivo principal deste controlador foi o de estabelecer um fluxo unidimensional e de minimizar os efeitos provocados pelas paredes. Um sistema elevatório acoplado ao controlador de fluxo possibilita 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.

Um sistema de drenos instalado no final do canal mantém o nível d'água constante na praia, possibilitando minimizar o efeito da deposição subaquática. Um outro sistema de drenos instalado ao longo do fundo do canal permite a simulação da drenagem vertical que se apresenta normalmente nas condições de campo (Ribeiro, 2000).

### **3.3.2 Metodologia dos Ensaio de Simulação de Deposição Hidráulica**

Antes da realização dos ensaios, é necessária uma preparação prévia do ensaio. Tanto o reservatório secundário quanto o reservatório auxiliar são preenchidos com 800 l de água,

cada um. É realizada a conformação da camada do fundo do canal, o controlador de fluxo é colocado na posição inicial, coincidente com a elevação final da camada de fundo, e são realizadas a checagem dos registros e o funcionamento perfeito do sistema de bombeamento.

O rejeito a ser utilizado é pesado e acondicionado em sacos de 15 kg. Uma amostra representativa do rejeito é levada à estufa para a determinação do teor de umidade do material, com o objetivo de realizar a devida correção de umidade para a preparação da mistura na concentração especificada. A quantidade de material necessária para atingir a referida concentração é determinada a partir da relação entre os pesos de água e de sólidos como apresentado a seguir.

$$c = \frac{W_s}{W_t} \times 100\% \quad (3.3)$$

sendo:

c: Concentração da mistura (%);

$W_s$ : Peso de sedimentos;

$W_t$ : Peso total.

A partir desta relação, é determinada a quantidade de material necessária para que, quando acrescentada aos 800 l de água presentes no reservatório secundário, seja atingida a concentração esperada.

No primeiro estágio do ensaio, o misturador do reservatório secundário é acionado e gradualmente, é acrescentado o material para a obtenção da mistura, obtendo-se, ao final da descarga de rejeitos, uma lama homogênea com concentração constante. Posteriormente, é iniciado o bombeamento da lama para o reservatório principal localizado na parte superior do equipamento. Uma vez que o reservatório principal apresente um nível estável, a válvula de controle que permite a saída da lama para o controlador de fluxo é aberta, dando início ao processo de deposição no canal.

Iniciado o processo de deposição no canal, é feita a regulação da vazão através de medidas periódicas do volume de lama que entra no controlador de fluxo. Este processo é realizado durante todo o tempo de duração do ensaio visando a garantir a manutenção da vazão através de um adequado controle. Igualmente ao controle de vazão, são realizadas verificações periódicas da concentração da mistura. Adicionalmente, são realizadas coletas de amostras ao

longo do período de realização do ensaio, para a estimativa da concentração real da lama que passa pelo controlador de fluxo. Estas amostras são, também, utilizadas para a caracterização do material que entra no processo antes de sofrer segregação hidráulica no canal.

No decorrer do ensaio, é feito o ajuste do controlador de fluxo de forma a manter sempre constante a altura entre a borda do controlador e a crista da praia. Este controle é realizado por meio do ajuste da velocidade de ascensão do controlador por um sistema eletrônico acoplado a ele. Adicionalmente, é feita a medição da evolução do depósito através da medida da altura da crista com o tempo de ensaio. Esta medição permite acompanhar posteriormente a evolução do processo de elevação da crista ao longo do ensaio e realizar comparações desta propriedade entre os diferentes ensaios realizados nas diferentes vazões e concentrações.

Para atingir a espessura da praia necessária para a realização da amostragem foi necessário um reabastecimento do reservatório secundário. Para este processo, utilizou-se o terceiro reservatório ou reservatório auxiliar. Assim, foram transferidos 800 l de água do reservatório auxiliar para o reservatório secundário e, simultaneamente, foi acrescentada a quantidade de material necessário para atingir a concentração desejada. É importante ressaltar que este procedimento deve ser realizado sem interrupção do processo de deposição visando à manutenção da vazão e concentração constantes e também a homogeneidade do processo de lançamento. Para garantir a manutenção das características da simulação, uma vez realizado o reabastecimento, é feita a checagem das condições da vazão e da concentração na entrada do controlador de fluxo durante e após o reabastecimento. De uma maneira geral, o procedimento de reabastecimento proporciona uma manutenção das características do processo de deposição adotado.

O sistema de drenos instalados no final do canal é continuamente ajustado durante o ensaio para manter o nível da água no final da praia sempre constante. Este controle é realizado para que o processo de deposição não ocorra sob a forma subaquática, já que, nesta situação, as condições da deposição hidráulica são alteradas.

Após o aterro atingir uma altura de aproximadamente 200 a 300 mm, o processo de deposição é paralisado, sendo realizadas as primeiras leituras referentes à configuração final do talude do depósito formado. Este processo de leituras é realizado ao longo de três eixos longitudinais, espaçados a 100 mm, sendo o eixo intermediário locado no meio da praia. Os

resultados destas medições possibilitam a determinação da configuração final da praia, assim como permitem obter a inclinação global da mesma.

### 3.3.3 Materiais Utilizados na Campanha de Ensaios de Simulação de Deposição Hidráulica

Para a realização dos ensaios de deposição hidráulica foram utilizados três tipos de rejeito, sendo o primeiro um rejeito de minério de ferro, proveniente da mina Morro Agudo, localizada no estado de Minas Gerais. Os outros dois materiais são rejeitos de minério de ouro da mina Morro do Ouro, também localizada no estado de Minas Gerais. Destes dois, um é o rejeito normalmente descartado do processo de beneficiamento, e o outro corresponde à fração *underflow* (partículas grossas) do rejeito de ouro após ter sido submetido a um processo de ciclonagem. A Tabela 3.3 apresenta um resumo das principais características geotécnicas dos três diferentes rejeitos estudados.

Tabela 3.3 Propriedades geotécnicas dos rejeitos estudados nos ensaios de deposição hidráulica

Propriedade	Unid.	Rejeito de Minério de Ferro	Rejeito de Minério de Ouro	Rejeito de Minério de Ouro Ciclonado ( <i>underflow</i> )
Peso específico dos grãos ( $\gamma_s$ )	kN/m <sup>3</sup>	34,70	28,03	28,15
Conteúdo de Ferro (Fe)	%	31,5	-	-
Diâmetro efetivo ( $D_{10}$ )	mm	0,067	0,025	0,077
Diâmetro médio ( $D_{50}$ )	mm	0,207	0,169	0,210
$D_{60}$	mm	0,237	0,207	0,233
$D_{90}$	mm	0,457	0,400	0,407
Coefficiente de uniformidade (CU)	-	3,54	8,28	3,03
$D_{90} / D_{10}$	-	6,85	16,00	5,29
Passa na peneira N. 200 (<0,074mm)	(%)	12,6	20,4	9,1

### 3.3.4 Campanha de Ensaios de Simulação de Deposição Hidráulica

Esta nova campanha de ensaios de deposição possibilitou, entre outras coisas, a validação do modelo que tem sido apresentado por Cavalcante & Assis (2002a, 2002b e 2003), ressaltando

que este modelo foi elaborado com dados obtidos por Ribeiro (2000), neste mesmo equipamento, e que foram utilizados durante o processo de calibração do modelo. Adicionalmente, foi realizada uma série de experiências com as técnicas de resistividade para avaliar sua aplicabilidade no ESDH.

Para a obtenção de amostras indeformadas de rejeito nas praias de deposição simuladas no ESDH, foram testadas diferentes técnicas que são apresentadas na literatura e que podem ser relevantes para serem implementadas neste tipo de material (Seed *et al.*, 1982 e Vaid & Negussey, 1988). No entanto, foi utilizada a experiência adquirida pelos autores Tibana *et al.* (1998); Lopes (2000); Espósito (2000); Gomes *et al.* (2002); Hernandez (2002) e Presotti (2002), na reconstituição de corpos de prova e coleta de amostras neste material.

Para a avaliação da influência da concentração na campanha de ensaios de deposição hidráulica, foram utilizadas três concentrações diferentes 10, 15 e 25%. Para o estudo da importância nas mudanças da vazão, foram usadas as vazões de 10, 15 e 20 l/min. A combinação destas duas variáveis implica um total de nove ensaios de simulação de deposição para cada um dos dois materiais estudados, sendo o primeiro material o rejeito de minério de ferro da mina de Morro Agudo, e o segundo, o rejeito de minério de ouro da mina Morro do Ouro. Um terceiro material foi parcialmente estudado, sendo este a fração *underflow* do rejeito de minério de ouro após ter sido submetido a um processo de ciclonagem (partículas mais grosseiras). Neste último, foram realizados somente três ensaios de deposição hidráulica. A Tabela 3.4 apresenta os valores de concentração e vazão esperados nos ensaios de deposição hidráulica para os materiais estudados.

### **3.3.5 Ensaios de Permeabilidade ao longo das praias de deposição**

Após 24 h de conclusão do ensaio de deposição, foram realizados os ensaios de permeabilidade na praia formada, em função da distância ao ponto de descarga. Os procedimentos utilizados nestes ensaios foram baseados na metodologia proposta por Hvorslev (Lambe & Whitman, 1994) que permite realizar uma estimativa da permeabilidade em furos de sondagem utilizando um cilindro de parede delgada cravado no solo. A relação de Hvorslev que foi elaborada para avaliação da permeabilidade de um solo dentro do cilindro em um terreno uniforme em condições de carga variável é dada pela seguinte expressão:

$$k_v = \frac{\pi \times \frac{D}{m} + L}{t_2 - t_1} \ln \left( \frac{H_1}{H_2} \right) \quad (3.4)$$

sendo:

$k_v$ : Permeabilidade vertical na câmara (mm/s);

D: Diâmetro da amostra na câmara (mm);

L: Comprimento da amostra (mm);

$H_1, H_2$ : Carga piezométrica no tempo  $t_{1,2}$  (mm);

$t_1, t_2$ : Tempo (s);

m: Razão de transformação  $m = \sqrt{k_h/k_v}$ .

Tabela 3.4 Valores de concentração e vazão esperadas nos ensaios de deposição hidráulica para cada um dos materiais ensaiados

Ensaio	Material					
	Rejeito de Minério de Ferro		Rejeito de Minério de Ouro		Rejeito de Minério de Ouro Ciclonado ( <i>underflow</i> )	
	Concent. (%)	Vazão (l/min)	Concent. (%)	Vazão (l/min)	Concent. (%)	Vazão (l/min)
C10Q10	10	10	10	10	-	-
C10Q15	10	15	10	15	10	15
C10Q20	10	20	10	20	-	-
C15Q10	15	10	15	10	-	-
C15Q15	15	15	15	15	15	15
C15Q20	15	20	15	20	-	-
C25Q10	25	10	25	10	-	-
C25Q15	25	15	25	15	25	15
C25Q20	25	20	25	20	-	-

### 3.3.6 Determinação do peso específico seco ao longo das praias de deposição

Ao longo da praia, foi realizada uma amostragem cuidadosa, com o objetivo de avaliar a variação do peso específico na extensão da praia formada e determinar como este parâmetro



se comporta com as mudanças nas variáveis que condicionam o processo de deposição hidráulica e com as características dos rejeitos.

Para a determinação desta propriedade, foram obtidas amostras utilizando cilindros biselados de parede delgada, de 38 mm de diâmetro e 120 mm de comprimento, cravados ao longo do depósito. O processo de amostragem foi realizado 24 h após o término do ensaio para as praias de rejeito de minério de ferro, e 48 h após o término do ensaio para os dois materiais de rejeito de ouro. Este procedimento foi adotado em todos os ensaios e teve a finalidade de permitir a drenagem do excesso de água, melhorando a trabalhabilidade do material e obter, assim, amostras mais representativas (Ribeiro, 2000). O processo de coleta foi realizado de forma criteriosa evitando-se, ao máximo, perturbações na amostra durante o desbaste e a cravação do cilindro. Imediatamente após a coleta da amostra, o cilindro contendo a amostra foi pesado e, em seguida, procedeu-se à determinação das dimensões da amostra dentro do cilindro. Posteriormente foi feita a determinação da umidade para o cálculo da massa específica seca.

### **3.3.7 Coleta de amostras alteradas ao longo da praia de deposição para caracterização em laboratório**

Após um período de 48 h de conclusão do ensaio de deposição hidráulica, e de forma paralela à determinação do peso específico *in-situ*, foram tomadas amostras deformadas para a estimativa do padrão de segregação, do teor de umidade, da distribuição granulométrica com a utilização do granulômetro a *laser* e do peso específico das partículas sólidas ao longo do depósito com o emprego da técnica do picnômetro.

## **CAPÍTULO 4**

### **4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Os resultados obtidos nos ensaios de congelamento e resistividade elétrica, assim como nas modelagens de deposição hidráulica, para os rejeitos de minério de ferro e de ouro, e a caracterização em laboratório das amostras obtidas ao longo das praias são apresentados e analisados no presente capítulo, tendo como objetivo o entendimento do comportamento dos materiais.

#### **4.1 RESISTIVIDADE ELÉTRICA**

Como apresentado no Item 3.1, foi realizada uma campanha de ensaios de laboratório com a finalidade de se avaliar a influência das mudanças das condições dos depósitos de rejeito de minério de ferro na condutividade elétrica do material. Inicialmente, foi realizada a calibração do equipamento em uma solução de água destilada e cloreto de sódio (NaCl). Este procedimento visou a obtenção de curvas de calibração condutividade versus voltagem. Esta metodologia é necessária uma vez que é no próprio solo que é realizada a medição da queda de voltagem entre os eletrodos centrais do equipamento. Com este parâmetro e utilizando as curvas de calibração, é determinada a condutividade da massa de solo.

##### **4.1.1 Calibração do equipamento de resistividade elétrica**

A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos do processo de calibração do equipamento com solução de água destilada e sal. Nesta solução, a condutividade e a salinidade foram

determinadas com a utilização de um condutivímetro modelo CO150 da HACH, com correção automática por temperatura, pertencente ao Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília.

Tabela 4.1 Calibração do equipamento em uma solução de água destilada e cloreto de sódio

NaCl (g/l)	S (‰)	C (ms/cm)	$\rho$ ( $\Omega$ .m) $\rho=1/C$	T (°C)	Voltagem (V)		
					Baixa Excitação f=500 Hz	Média Excitação f=1000 Hz	Alta Excitação f=1500 Hz
0,0	0,0	0,031	322,581	25,7	1,075	1,100	1,085
0,1	0,1	0,22	46,08	25,6	0,967	0,985	1,000
0,2	0,2	0,42	23,64	25,6	0,913	0,928	0,943
0,4	0,4	0,81	12,32	25,6	0,838	0,851	0,865
0,6	0,6	1,23	8,10	25,7	0,772	0,788	0,798
0,8	0,8	1,61	6,23	25,7	0,725	0,739	0,749
1,0	1,0	1,99	5,03	25,8	0,679	0,693	0,705
1,2	1,2	2,37	4,22	25,7	0,640	0,659	0,669
1,4	1,4	2,74	3,65	25,7	0,612	0,627	0,635
1,6	1,6	3,11	3,22	25,7	0,578	0,592	0,602
1,8	1,8	3,45	2,90	25,7	0,553	0,565	0,575
2	2,0	3,85	2,60	25,7	0,523	0,534	0,543
4	4,1	7,35	1,36	25,7	0,358	0,370	0,373
6	6,1	10,86	0,92	25,7	0,278	0,287	0,287
8	8,2	14,14	0,71	25,7	0,228	0,231	0,232
10	10,2	17,38	0,58	25,6	0,194	0,198	0,195
15	15,6	25,60	0,39	25,6	0,148	0,144	0,142
20	20,7	33,10	0,30	25,6	0,116	0,112	0,110
30	30,7	47,10	0,21	25,5	0,088	0,081	0,078
40	40,3	60,10	0,17	25,4	0,070	0,064	0,060
50	50,6	73,30	0,14	25,0	0,053	0,045	0,041
60	59,9	84,60	0,12	25,1	0,044	0,042	0,040
70	68,7	95,20	0,11	25,2	0,043	0,039	0,035
80	77,5	105,40	0,09	25,1	0,040	0,035	0,033
90	-	115,20	0,09	24,9	0,035	0,031	0,029
100	-	124,30	0,08	24,8	0,034	0,029	0,026
120	-	139,60	0,07	24,7	0,029	0,025	0,024
140	-	154,90	0,06	24,6	0,026	0,022	0,020
160	-	166,60	0,06	24,6	0,024	0,021	0,017
200	-	188,50	0,05	24,3	0,021	0,017	0,014

Sendo:

NaCl: Concentração de NaCl;

S: Salinidade;

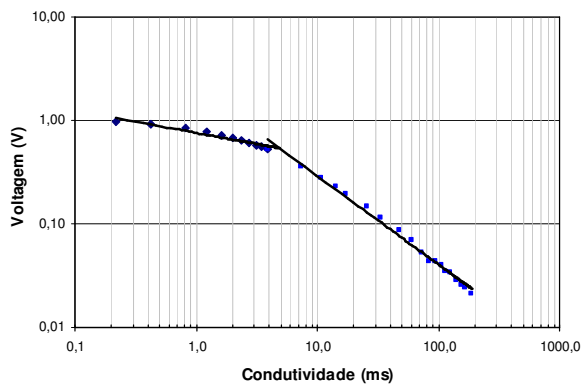
C: Condutividade;

$\rho$ : Resistividade;

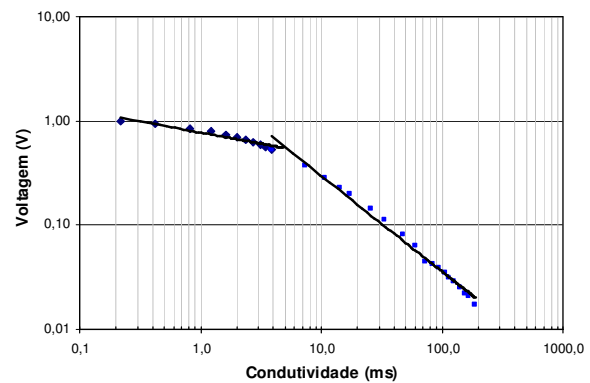
T: Temperatura.

A partir da separação de uma amostra de rejeito, foram obtidos dois materiais com teores de ferro diferentes, 1,5% para o Material Q e 75% para o Material Fe. Em uma caixa de madeira estes materiais foram compactados, de acordo com os dados apresentados na Tabela 3.2, com a finalidade de explorar a influência do índice de vazios e do grau de saturação na resistividade elétrica de cada material.

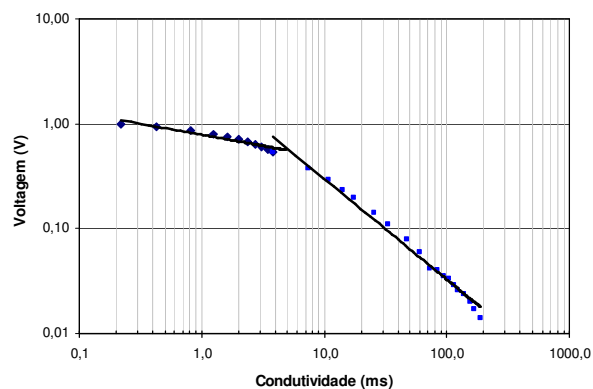
A Figura 4.1 apresenta as curvas de calibração condutividade versus voltagem para o equipamento submerso na solução de água destilada e cloreto de sódio. A Figura 4.1a apresenta a relação entre a condutividade e a voltagem para o caso de uma frequência ( $f$ ) de excitação de 500 Hz. As Figura 4.1b e 4.1c apresentam as relações condutividade versus voltagem para frequências de excitações de 1000 e 1500 Hz, respectivamente.



(a) Baixa frequência  $f = 500$  Hz



(b) Média frequência  $f = 1000$  Hz



(c) Alta frequência  $f = 1500$  Hz

Figura 4.1 Curvas de calibração condutividade vs. voltagem para diferentes frequências de excitação; (a)  $f = 500$  Hz; (b)  $f = 1000$  Hz; (c)  $f = 1500$  Hz.

As relações de Condutividade vs. Voltagem apresentadas na Figura 4.1 têm ajuste potencial da forma  $V = a \times C^{-b}$ . Sendo V a variável independente, é necessária a inversão da equação. Realizando o desenvolvimento matemático e determinando a condutividade como uma função da voltagem (V) e dos termos de ajuste  $a$  e  $b$ , obtém-se a equação dada por:

$$C = \text{Exp} \left[ \frac{\ln a - \ln V}{b} \right] \quad (4.1)$$

Realizando o ajuste para cada uma das freqüências de excitação e dividindo a curva em dois trechos  $C < 5$  ms e  $C > 5$  ms, foi possível chegar ao sistema de equações abaixo, que permite a determinação da condutividade, em ms/cm, para cada uma das freqüências de excitação:

$$f = 500 \text{ Hz} \quad C = \text{Exp} \left[ \frac{\ln 0,7573 - \ln V}{0,2147} \right]; \quad V < 0,5360 \text{ V} \quad (4.2)$$

$$C = \text{Exp} \left[ \frac{\ln 2,0838 - \ln V}{0,8556} \right]; \quad V > 0,5360 \text{ V} \quad (4.3)$$

$$f = 1000 \text{ Hz} \quad C = \text{Exp} \left[ \frac{\ln 0,7726 - \ln V}{0,212} \right]; \quad V < 0,5493 \text{ V} \quad (4.4)$$

$$C = \text{Exp} \left[ \frac{\ln 2,4466 - \ln V}{0,9172} \right]; \quad V > 0,5493 \text{ V} \quad (4.5)$$

$$f = 1500 \text{ Hz} \quad C = \text{Exp} \left[ \frac{\ln 0,7844 - \ln V}{0,2118} \right]; \quad V < 0,5578 \text{ V} \quad (4.6)$$

$$C = \text{Exp} \left[ \frac{\ln 2,729 - \ln V}{0,9609} \right]; \quad V > 0,5578 \text{ V} \quad (4.7)$$

#### 4.1.2 Ensaios de resistividade elétrica nos materiais Q e Fe

O passo seguinte foi a realização da campanha de ensaios de laboratório apresentada na Tabela 3.2. Os resultados da realização dos ensaios de determinação da queda de voltagem nos dois materiais utilizados (Material Q e Material Fe) estão apresentados no Apêndice A.

As Tabelas A.1 e A.2 contêm todas as informações referentes aos ensaios de compactação das amostras para a realização da determinação da queda de voltagem. Entre estas informações, pode-se ressaltar a umidade de compactação, o índice de vazios real, o grau de saturação real e a temperatura final da amostra, entre outros.

A Tabela 4.2 apresenta a condutividade estimada para cada um dos materiais, nas diferentes características de compactação, em função dos índices de vazios, das porosidades e dos graus de saturação.

Tabela 4.2 Condutividade e resistividade estimadas para cada um dos materiais ensaiados

Material Q						Material Fé					
$e_r$	$n_r$ (%)	$S_r$ (%)	T (°C)	$C_{med}$ (ms)	$\rho_{med}$ (.m)	$e_r$	$n_r$ (%)	$S_r$ (%)	T (°C)	$C_{med}$ (ms)	$R_{med}$
0,613	38,0	0,3	27,5	1,850	0,541	0,667	40,0	0,7	27,0	3,096	0,323
0,695	41,0	0,3	27,0	1,860	0,538	0,754	43,0	0,7	26,8	3,078	0,325
0,818	45,0	0,2	27,0	1,702	0,588	0,887	47,0	0,6	26,5	2,529	0,395
0,923	48,0	0,2	27,0	1,431	0,699	1,041	51,0	0,5	26,5	2,242	0,446
0,600	37,5	21,8	26,0	3,602	0,278	0,666	40,0	24,6	26,0	4,014	0,249
0,686	40,7	23,2	26,0	3,448	0,290	0,751	42,9	24,0	26,0	3,581	0,279
0,813	44,8	24,1	26,0	3,250	0,308	0,882	46,9	23,9	26,0	3,610	0,277
0,926	48,1	25,5	26,0	3,204	0,312	1,034	50,8	23,8	26,0	3,741	0,267
0,600	37,5	47,0	26,0	4,806	0,208	0,665	39,9	49,4	26,5	6,783	0,147
0,689	40,8	49,0	26,0	4,772	0,210	0,751	42,9	49,1	26,5	6,632	0,151
0,814	44,9	49,5	26,0	4,563	0,219	0,881	46,8	48,5	26,5	9,514	0,105
0,912	47,7	48,6	26,0	4,390	0,228	1,035	50,9	49,0	26,3	7,498	0,133
0,523	34,3	81,9	26,0	4,802	0,208	0,691	40,9	83,2	26,0	8,085	0,124
0,633	38,7	90,2	25,8	4,981	0,201	0,788	44,1	84,3	26,0	9,285	0,108
0,716	41,7	86,8	25,7	5,023	0,199	0,890	47,1	75,9	26,5	10,625	0,094
0,787	44,0	84,9	25,5	5,081	0,197	1,006	50,1	68,5	26,5	11,697	0,085
0,581	36,7	83,8	26,0	5,123	0,195	0,660	39,8	87,8	26,0	7,533	0,133
0,636	38,9	84,8	25,8	5,406	0,185	0,707	41,4	85,0	26,0	7,902	0,127
0,693	40,9	85,4	25,7	5,750	0,174	0,778	43,8	88,0	25,8	9,150	0,109
0,759	43,1	86,5	25,5	6,640	0,151	0,843	45,7	87,9	25,0	6,746	0,148
0,820	45,0	86,2	25,7	6,059	0,165	0,905	47,5	86,3	25,0	7,532	0,133
0,870	46,5	84,3	25,5	5,633	0,178	1,003	50,1	83,2	25,0	7,856	0,127
0,915	47,8	81,7	25,5	5,219	0,192	-	-	-	-	-	-

Sendo:

- $e_r$ : Índice de vazios real de compactação;
- $n_r$ : Porosidade real de compactação;
- $S_r$ : Porcentagem de saturação real de compactação;
- T: Temperatura;

$C_{med}$ : Condutividade média;  
 $\rho$ : Resistividade média.

Com esta informação foi determinado o Fator de Formação ( $F$ ) para cada um dos materiais. O fator de formação relaciona a resistividade do meio saturado com a resistividade do fluido presente nos poros do solo. Assim, o fator de formação depende da estrutura dos poros do meio. O fator  $F$ , relação entre a resistividade do meio ( $\rho_o$ ) e a resistividade do fluido presente nos poros ( $\rho_w$ ), é dado pela Equação 4.8. Nas Tabelas A.1 e A.2, do Apêndice A, podem ser observados os valores do Fator de Formação determinados para os materiais ensaiados.

$$F = \frac{\rho_o}{\rho_w} \quad (4.8)$$

O passo seguinte foi a determinação da influência da porosidade no fator de formação. A Figura 4.2 apresenta graficamente a relação existente entre o fator de formação e a porosidade do material.

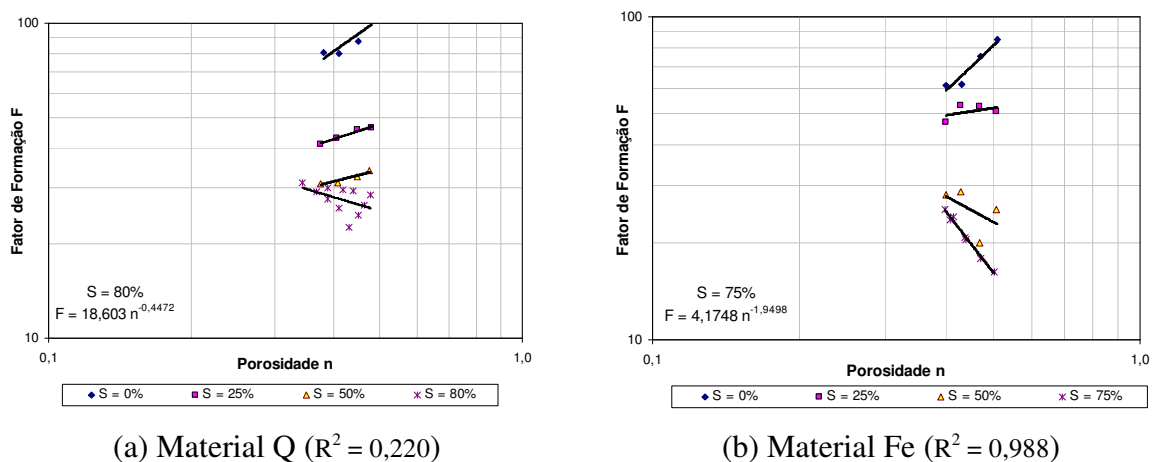
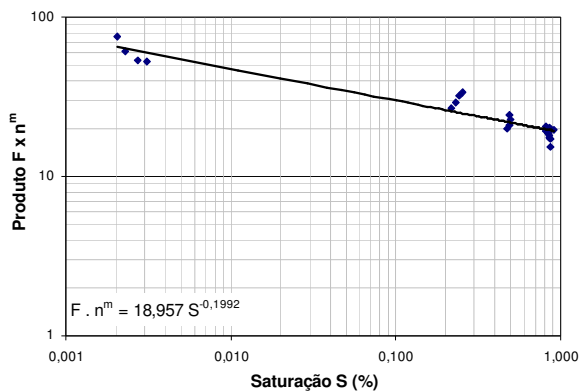


Figura 4.2 Relação entre a porosidade e o fator de formação para os materiais ensaiados:  
(a) Material Q; (b) Material Fe.

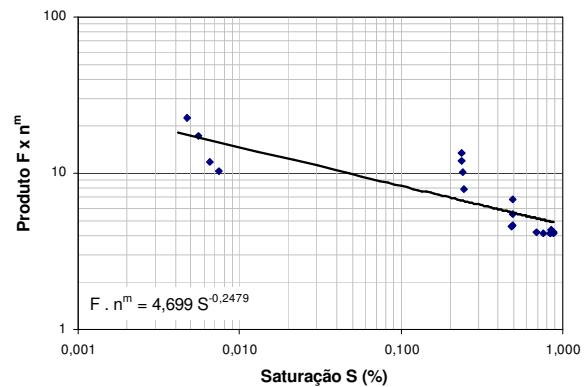
Na Figura 4.2, é possível observar a equação de ajuste para o caso de maior saturação ( $S=80\%$  para o material Q e  $S=75\%$  para o material Fe). As equações são da forma  $F = a \times n^{-m}$ . Neste caso,  $m$  é o coeficiente que relaciona a variação do Fator de Formação com as mudanças na porosidade. Para estes dois materiais, foram determinados coeficientes  $m$  de 0,45 para o

Material Q e de 1,95 para o Material Fe. Com este coeficiente foi determinado o produto  $a = F \times n^m$ .

A seguinte fase no processo de calibração é determinar a influência do grau de saturação no produto  $F \times n^m$ . Com este objetivo foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 4.3 no qual é possível observar a relação entre o produto  $F \times n^m$  e o grau de saturação.



(a) Material Q ( $R^2 = 0,921$ )



(b) Material Fe ( $R^2 = 0,704$ )

Figura 4.3 Relação entre o produto  $F \times n^m$  e o grau de saturação: (a) Material Q; (b) Material Fe.

Na Figura 4.3, é possível observar as relações de ajuste entre o produto  $F \times n^m$  e o grau de saturação. Estas relações de ajuste são da forma  $F \times n^m = b \times S^{-s}$ . Para estas relações o expoente  $s$  representa a variação do produto do Fator de Formação com a porosidade com relação às mudanças no grau de saturação do solo estudado.

Neste ponto do processo de calibração, caracterizou-se como o Fator de Formação  $F$  é influenciado pelas mudanças na porosidade e pelas alterações do grau de saturação. Falta, portanto, definir o ponto de partida da relação de calibração. Foram, então, determinados os produtos  $n^{-m} \times S^{-s}$  para cada uma das amostras compactadas. Na Figura 4.4 é apresentada a relação gráfica entre o produto  $n^{-m} \times S^{-s}$  e o Fator de Formação para cada um dos materiais utilizados.



O melhor ajuste para os dados da Figura 4.4 são relações da forma apresentada na Equação 4.9. As Equações 4.10 e 4.11 contêm os melhores ajustes para os pontos ilustrados na Figura 4.4 para cada um dos materiais ensaiados.

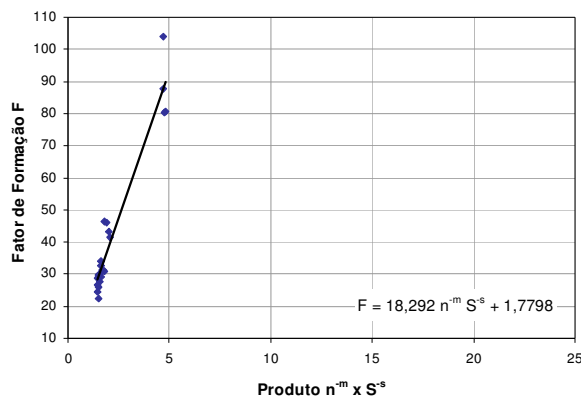
$$F = a(n^{-m} \times S^{-s}) + b \quad (4.9)$$

Material Q:

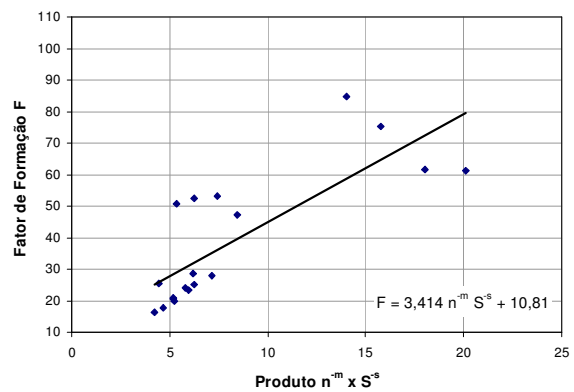
$$F = 18,292(n^{-0,45} \times S^{-0,197}) + 1,78 \quad (4.10)$$

Material Fe:

$$F = 3,414(n^{-1,95} \times S^{-0,248}) + 10,81 \quad (4.11)$$



(a) Material Q ( $R^2 = 0,930$ )



(b) Material Fe ( $R^2 = 0,623$ )

Figura 4.4 Relação entre o produto  $n^{-m} \times S^{-s}$  e o fator de formação  $F$ : (a) Material Q; (b) Material Fe.

Observe-se que o valor do coeficiente  $m$  apresenta grande variação entre um material e o outro. O coeficiente  $m$  varia entre 0,447 para o Material Q a 1,95 para o Material Fe. Este fenômeno deve-se a influência do teor de ferro no comportamento elétrico destes materiais. Na medida em que o material apresenta um maior teor de ferro, a importância da porosidade faz-se mais evidente, tendo o parâmetro  $n^{-m}$  um peso maior na determinação do Fator de Formação.

Tendo como base esta observação, foi elaborada, então, uma relação de variação do coeficiente  $m$  em função do incremento no teor de ferro do material ( $Fe$ ). Esta relação de variação é dada por:

$$m = \frac{Fe + 0,2}{0,5} \quad (4.12)$$

Onde  $Fe$  é a proporção de ferro entre  $0,015 \leq Fe \leq 0,75$ .

O coeficiente  $s$  apresenta pouca variação entre os materiais, passando de 0,197 para o Material Q e chegando a 0,248 para o Material Fe. A pouca variação neste parâmetro indica que o grau de saturação apresenta uma influência similar nos dois casos, podendo inclusive ser utilizado um valor único, neste caso  $s_{med} = 0,223$ , sem influenciar significativamente o peso do parâmetro  $S^{-s}$  no resultado final da equação. Com a utilização do valor  $s_{med}$  obtém-se uma diferença média de 0,75% ao avaliar o peso do parâmetro  $S^{-s}$  com relação aos dois valores de  $s$  determinados experimentalmente.

O coeficiente  $a$  governa a inclinação da relação de ajuste. Para o Material Q (1,5% de ferro) o coeficiente apresenta um valor de 18,292, o que indica a alta variação do Fator de Formação com as mudanças do produto  $n^{-m} \times S^{-s}$ . Para o Material Fe (75% de ferro), que apresenta um alto conteúdo de ferro, o coeficiente apresenta um valor de 3,414. Esta observação permite identificar que, em materiais com baixo teor de ferro, a importância nas condições dos vazios da massa de solo e as condições de saturação têm um peso mais relevante no aumento da resistividade do meio e, por consequência, no aumento do Fator de Formação. Para materiais com teores maiores de ferro, grandes mudanças, tanto na estrutura dos vazios como no grau de saturação, apresentam um impacto muito menor no aumento da resistividade, indicando que parte da transmissividade da corrente elétrica já está relacionada pela estrutura da massa de solo.

Tentando obter uma relação de variação do coeficiente  $a$  com relação ao teor de ferro do material ( $Fe$ ), foi elaborada a equação apresentada a seguir:

$$a = \frac{0,92 - Fe}{0,05} ; \quad 0,015 \leq Fe \leq 0,75 \quad (4.13)$$

O coeficiente  $b$  da Equação 4.9 é simplesmente um parâmetro de ajuste e não tem significado físico. No entanto, na medida em que o produto  $n^{-m} \times S^{-s}$  se aproxima de zero (alta porosidade e alto grau de saturação), a massa de solo tende a ter uma resistividade próxima da resistividade do fluido que preenche os poros. Assim, o Fator de Forma nestes casos tende a um. Para casos práticos, pode-se considerar que o coeficiente  $b$  apresenta um valor de zero no peso total da Equação 4.9, tendo esta, interseção na origem de coordenadas.

Com as observações anteriores, pode-se reescrever a relação apresentada na Equação 4.9. Desta forma, a Equação 4.14 apresenta uma relação mais geral entre o produto  $n^{-m} \times S^{-s}$  e o Fator de Formação, na qual é levado em conta o efeito das mudanças no teor de ferro do material de rejeito de minério de ferro:

$$F = \left[ \frac{0,92 - Fe}{0,05} \right] \left( n^{-\left(\frac{Fe+0,2}{0,5}\right)} \times S^{-0,223} \right) \quad (4.14)$$

Esta relação é válida no intervalo de dados utilizados para sua elaboração:  $0,015 \leq Fe \leq 0,75$ ;  $0,37 \leq n \leq 0,48$ ;  $0,0 \leq S \leq 0,90$ .

A Equação 4.14 representa a influência do teor de ferro no comportamento da resistividade do rejeito de minério de ferro.

## 4.2 CONGELAMENTO DE REJEITOS GRANULARES

Os ensaios de congelamento nas amostras de rejeito de minério de ferro, como apresentado no Capítulo 3, possibilitaram a avaliação do processo de congelamento no comportamento do índice de vazios do material. A Tabela 4.3 resume os resultados dos ensaios de congelamento nas amostras compactadas, sendo aplicável a seguinte terminologia:

- Am: Nome da Amostra;
- S: Saturação desejada;
- S<sub>real</sub>: Saturação ao final da compactação da amostra;
- V: Volume final da amostra;
- V<sub>w</sub>: Volume de água na amostra;
- M: Massa real da amostra compactada;

- $V_s$ : Volume de sólidos;  
 $V_v$ : Volume de vazios ao final do processo de compactação;  
 $e_r$ : Índice de vazios real da amostra compactada;  
 $V_{vc}$ : Volume de vazios da amostra após o congelamento durante 48 horas;  
 $e_c$ : Índice de vazios da amostra após o processo de congelamento durante 48 horas;  
 $\Delta e$ : Variação do índice de vazios entre as fases antes e após o congelamento;  
 $\Delta e\%$ : Variação percentual da mudança do índice de vazios;  
 NQ: Nota qualitativa da trabalhabilidade da amostra (1 a 5).

Tabela 4.3 Resultados dos ensaios de congelamento em amostras de rejeito de ferro

Am.	S (%)	$S_{real}$ (%)	V ( $mm^3$ )	$V_w$ ( $mm^3$ )	M (g)	$V_s$ ( $mm^3$ )	$V_v$ ( $mm^3$ )	$e_r$	$V_{vc}$ ( $mm^3$ )	$e_c$	$\square e$	$\square e$ (%)	NQ 1-5
AC-01	100	100,0	187901	89694	363,20	108744	89694	0,728	93163	0,857	0,129	17,7	3
AC-02	90	98,8	190757	80725	364,18	109037	81720	0,749	86998	0,798	0,048	6,5	4
AC-03	80	83,9	194768	71756	364,72	109199	85569	0,784	90088	0,825	0,041	5,3	4
AC-04	70	74,3	193992	62786	365,58	109456	84536	0,772	87167	0,796	0,024	3,1	5
AC-05	60	64,8	192397	53817	365,42	109408	82989	0,759	84194	0,770	0,011	1,5	5
AC-06	50	54,4	191890	44847	365,64	109474	82415	0,753	84196	0,769	0,016	2,2	5
AC-07	40	44,1	190749	35878	365,62	109468	81280	0,743	82616	0,755	0,012	1,6	5
AC-08	30	32,1	193361	26908	365,80	109522	83839	0,766	85310	0,779	0,013	1,8	5
AC-09	20	20,3	197721	17939	365,87	109543	88178	0,805	88997	0,812	0,007	0,9	4
AC-10	15	15,0	199232	13454	365,86	109540	89692	0,819	90912	0,830	0,011	1,4	4
AC-11	10	10,9	192107	8969	366,07	109603	82504	0,753	83419	0,761	0,008	1,1	3
AC-12	5	5,4	192703	4485	366,28	109665	83038	0,757	82952	0,756	-1E-3	-0,1	3

O processo de congelamento induz mudanças na estrutura da amostra. Isto ficou evidente ao observar a forma que as amostras de grau de saturação maior apresentavam no momento em que foram retiradas dos cilindros. A Figura 4.5 apresenta a fotografia da amostra que foi compactada com um grau de saturação de 100%. As paredes laterais da amostra sofreram pouca ou nenhuma mudança aparente, devido ao confinamento lateral. A parte central da amostra sofreu a maior parte da deformação.

As observações feitas durante o processo de extração das amostras e os resultados obtidos da medição dos corpos de prova permitiram a confirmação do fenômeno de expansão de solos congelados. A Figura 4.6 apresenta os resultados de mudanças no índice de vazios das amostras congeladas em função do grau de saturação inicial.



Figura 4.5 Amostra de rejeito congelado com índice de vazios inicial de 0,818 e grau de saturação de 100%.

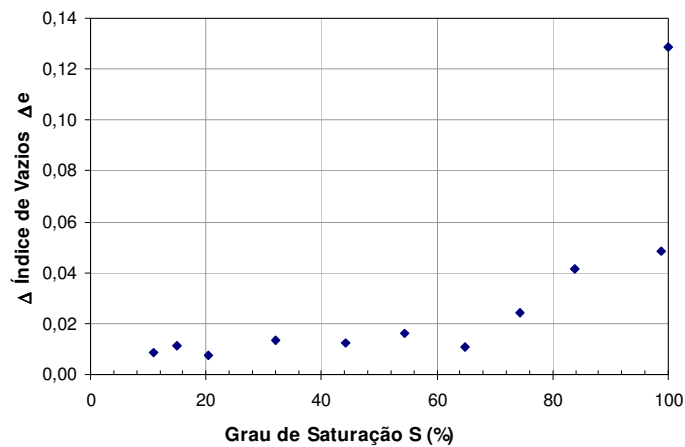


Figura 4.6 Mudança no índice de vazios em função do grau de saturação após o processo de congelamento de 24 h.

Para um grau de saturação de 100% obteve-se uma mudança do índice de vazios do dobro em comparação com a mudança observada para uma amostra de grau de saturação aproximada de 90%. Este valor pode ser explicado pela migração da água interna na amostra de solo para a parte superficial do corpo de prova. Este fenômeno ocorre devido a uma maior disponibilidade de água nos vazios da amostra em conjunto com o aparecimento do fenômeno de capilaridade na camada mais superficial do corpo de prova. Devido a estas observações, para a análise seguinte, foi desconsiderado o ponto correspondente ao grau de saturação de 100%.

Assim, a Figura 4.7 apresenta os resultados dos testes de congelamento, eliminando-se o ponto correspondente a 100% de saturação e realizando uma ampliação da escala gráfica, o que permite uma melhor análise dos dados.

A reapresentação dos dados na Figura 4.7 facilita a interpretação dos resultados. Da análise da Figura 4.7a, pode-se observar uma mudança no comportamento da massa de solo úmido submetida a um processo de congelamento. Para graus de saturação abaixo de 75%, a taxa de incremento na mudança do índice de vazios é relativamente baixa na medida em que se aumenta o grau de saturação. A partir de 75% de porcentagem de saturação, a relação de incremento na mudança do índice de vazios durante o processo de congelamento apresenta-se 5,5 vezes maior do que para as amostras compactadas abaixo de 75%.

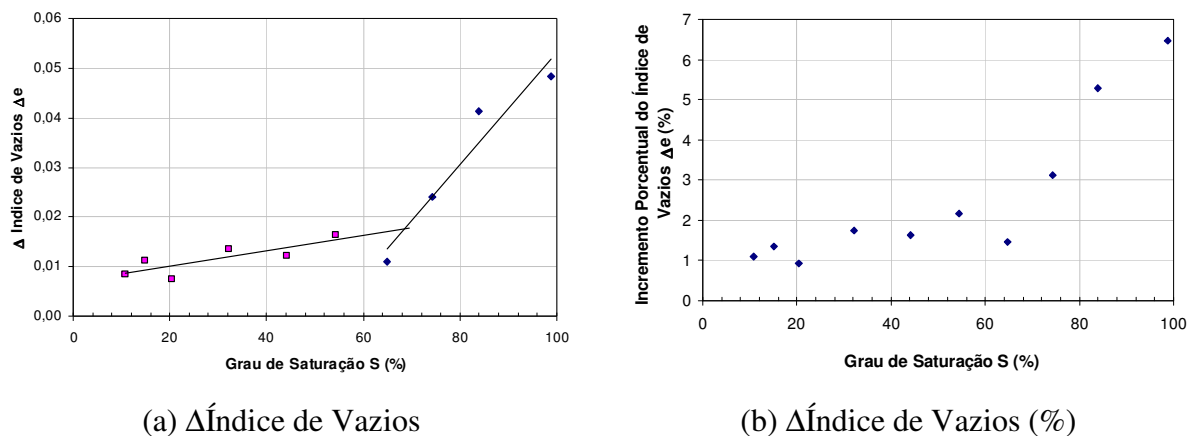


Figura 4.7 Reapresentação dos dados de mudança no índice de vazios em função do grau de saturação após o congelamento: (a)  $\Delta$ Índice de vazios; (b)  $\Delta$ Índice de vazios (%).

Da Figura 4.7b pode-se observar que abaixo de 70% de saturação as mudanças do índice de vazios são, em média, de 1,5%. As amostras congeladas com porcentagem de saturação superiores a 70% apresentam porcentagem de mudança no índice de vazios de 5,0%.

A coluna NQ (Nota qualitativa da trabalhabilidade da amostra) da Tabela 4.3 representa uma avaliação subjetiva, dada pelo autor, às condições de trabalho da amostra como facilidade para a retirada da amostra do cilindro, fragilidade dos corpos de prova e tempo durante o qual a amostra se deixa manipular sem começar a perder material das suas paredes (consistência à manipulação, sendo NQ = 1 para as amostras de difícil manipulação e NQ = 5 para as amostras com melhor trabalhabilidade).

As amostras com porcentagens de saturação acima de 80% apresentaram uma alta resistência (pouca fragilidade), assim como uma excelente consistência. No entanto, o processo de retirar as amostras dos cilindros apresentou diferentes problemas, sendo necessário o emprego de elevadas forças para a extração das amostras, o que dificultou o processo. As amostras com porcentagem de saturação entre 32,1 e 74,3% apresentaram trabalhabilidade máxima (5). Isto indica que o processo de retirada das amostras dos cilindros foi relativamente simples, em que as amostras apresentaram pouca fragilidade e uma alta consistência.

As amostras com grau de saturação de 15,0 e 20,3% apresentaram facilidade de extração e pouca fragilidade. No entanto, a consistência das amostras foi menor que as amostras com maior grau de saturação. Ao contato com os dedos o material descongelava-se rapidamente, ficando impregnado na pele. As amostras com graus de saturação de 5,4 e 10,9% apresentaram facilidade para serem retiradas dos cilindros e uma alta fragilidade no processo de manipulação das mesmas, apresentando fraturas e trincas rapidamente. A consistência destas amostras foi muito baixa, apresentando uma elevada perda de material nos pontos onde as amostras eram seguradas com os dedos.

### **4.3 ENSAIOS DE DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA (ESDH)**

O controle das variáveis que influenciam o comportamento dos aterros de deposição hidráulica faz com que o Ensaio de Deposição Hidráulica seja uma importante ferramenta no entendimento do comportamento deste tipo de aterros. O equipamento permite a realização de ensaios com mudanças tanto da concentração como da vazão, permitindo estudar a influência de cada uma destas variáveis no processo de deposição.

A presente pesquisa teve como objetivo dar continuidade aos trabalhos iniciados por Ribeiro (2000) no estudo do comportamento dos aterros de deposição hidráulica tendo como base os resultados obtidos no ESDH. Desta forma, pretende-se explorar ainda mais as potencialidades do equipamento e aprofundar no entendimento dos resultados obtidos, e desta forma, no estudo do comportamento dos aterros hidráulicos formados a partir do lançamento de rejeito das minerações de ferro e de ouro.

Durante a realização dos ensaios de deposição hidráulica, foi realizado um controle das variáveis que definem o processo de segregação hidráulica. Na Tabela 4.4 estão apresentados os valores reais de concentração e vazão obtidos durante a realização dos ensaios para cada um dos materiais estudados. No total, foram realizados 21 ensaios de deposição hidráulica, sendo nove no material de rejeito de minério de ferro da mina de Morro Agudo, nove no material de rejeito de minério de ouro e três no material de rejeito de minério de ouro após ter sido submetido a um processo de ciclonagem, fração *underflow* (partículas mais grosseiras).

Tabela 4.4 Valores de concentração e vazão obtidos durante os ensaios de deposição hidráulica para cada um dos materiais ensaiados

Ensaio	Material					
	Rejeito de minério de ferro (Fe)		Rejeito de minério de ouro (Au)		Rejeito de minério de ouro ciclonado (Au-Cc) ( <i>underflow</i> )	
	Concent. (%)	Vazão (l/min)	Concent. (%)	Vazão (l/min)	Concent. (%)	Vazão (l/min)
C10Q10	8,78	9,79	10,98	10,15	-	-
C10Q15	10,71	13,93	10,53	14,89	10,95	15,07
C10Q20	12,10	21,80	11,40	19,28	-	-
C15Q10	18,28	8,57	18,71	9,77	-	-
C15Q15	17,58	15,15	16,85	16,16	16,69	15,70
C15Q20	14,98	20,44	16,57	19,79	-	-
C25Q10	24,57	11,37	28,57	8,96	-	-
C25Q15	26,72	17,44	27,44	15,55	28,50	14,45
C25Q20	24,92	20,03	25,86	21,34	-	-

Nos Apêndices B a D são apresentados, de forma gráfica, os resultados dos ensaios de simulação de deposição hidráulica realizados nos três materiais estudados. Nestes apêndices, podem-se observar, para cada um dos ensaios realizados, os resultados da geometria final das praias, da evolução da altura da crista, da variação da umidade e do peso específico ao longo das praias, bem como a variação do peso específico dos grãos nas praias de deposição.

Os resultados de variação granulométrica ao longo das praias de deposição, para cada um dos ensaios realizados, são apresentados nos Apêndices E a G. Nestes apêndices, podem-se observar as curvas granulométricas das diferentes amostras tomadas ao longo das praias, assim como a variação dos diâmetros efetivos  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  e  $D_{90}$ . Também se pode observar a variação, ao longo da praia, da porcentagem de material que passa na peneira No. 200 ( $<0,074\text{mm}$ ) para todos os ensaios de deposição hidráulica realizados.



O Apêndice H contém um registro fotográfico dos procedimentos de realização dos ensaios de deposição hidráulica. É apresentada uma visão geral do equipamento, bem como detalhes de cada um dos principais componentes. Ilustra também a seqüência de preparação das amostras e de execução dos ensaios e apresenta as técnicas de amostragem e de realização dos ensaios de permeabilidade nas praias obtidas.

A seguir são discutidos diferentes aspectos das praias de deposição obtidas nos ensaios realizados. Serão apresentados e analisados os resultados referentes à geometria, ao peso específico seco, ao peso específico das partículas, ao índice de vazios, à permeabilidade e à velocidade de variação da altura da crista com o tempo de ensaio.

#### **4.3.1 Geometria das praias de deposição e determinação do perfil típico (Melent'Ev, 1973 e Smith *et al.*, 1986)**

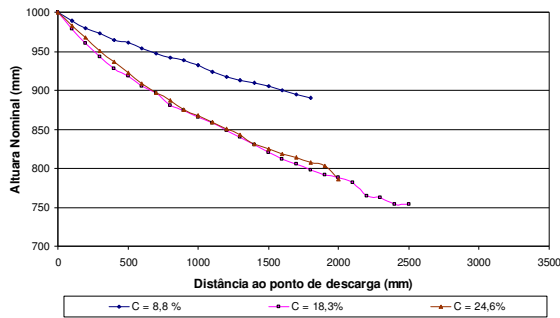
A geometria das praias de deposição hidráulica é controlada pelas variáveis do processo de deposição, sendo, em geral, côncava e de baixa inclinação. Nos ensaios realizados no ESDH as praias apresentaram esta forma típica. Com a finalidade de facilitar as comparações entre os diferentes perfis, tanto os obtidos na presente pesquisa como os apresentados na literatura, decidiu-se pela utilização da metodologia apresentada por Küpper *et al.*, (1992a) na qual a crista encontra-se localizada na ordenada 1 m (1000 mm), também denominada altura nominal.

##### **4.3.1.1 Rejeito de minério de ferro**

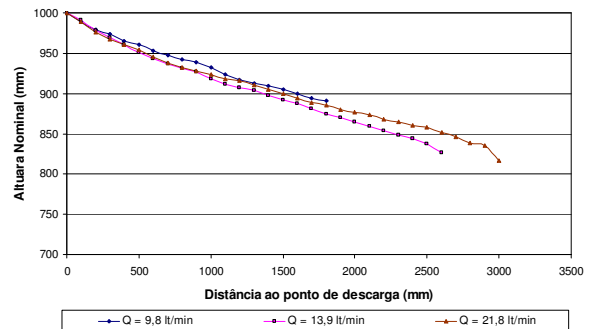
Nas Figuras 4.8a a 4.8c, tem-se o perfil de variação da altura nominal média em função da concentração para cada uma das faixas de vazões utilizadas nos ensaios realizados no material de rejeito de minério de ferro (Fe). Observe-se a forma côncava dos diferentes perfis e como, na medida em que a concentração aumenta, a inclinação da praia faz-se maior para a mesma vazão de descarga.

As Figuras 4.8d a 4.8f apresentam a variação da altura nominal média em função da vazão para cada uma das faixas de concentração utilizadas nos ensaios. Na figura fica evidente a

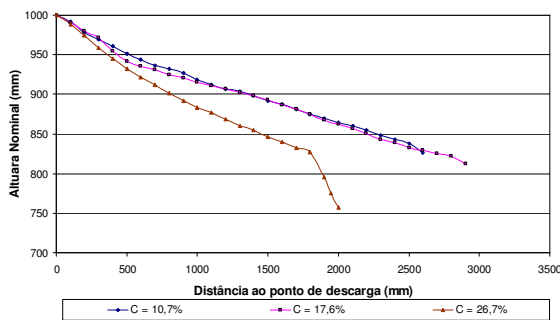
influência da vazão na inclinação da praia. Na medida em que a vazão aumenta, seu poder de transporte também aumenta, gerando praias mais longas e com uma inclinação menor com relação às de menor vazão. Este comportamento foi igualmente observado por Küpper *et al.* (1992a) e Ribeiro (2000).



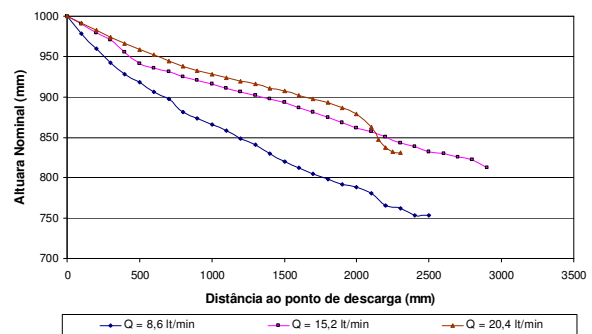
(a) Variação da H para várias C ( $Q \approx 10$  l/min)



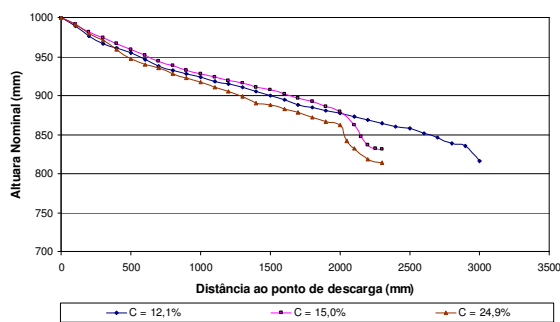
(d) Variação da H para várias Q ( $C \approx 10\%$ )



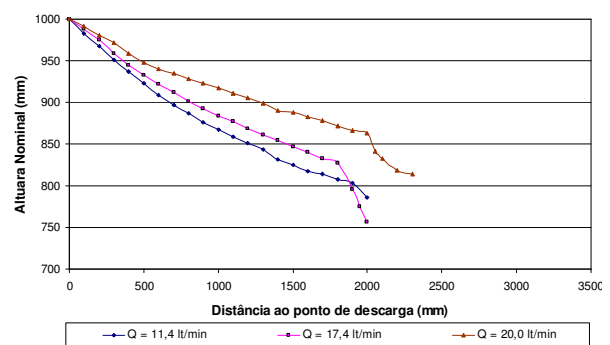
(b) Variação da H para várias C ( $Q \approx 15$  l/min)



(e) Variação da H para várias Q ( $C \approx 15\%$ )



(c) Variação da H para várias C ( $Q \approx 20$  l/min)



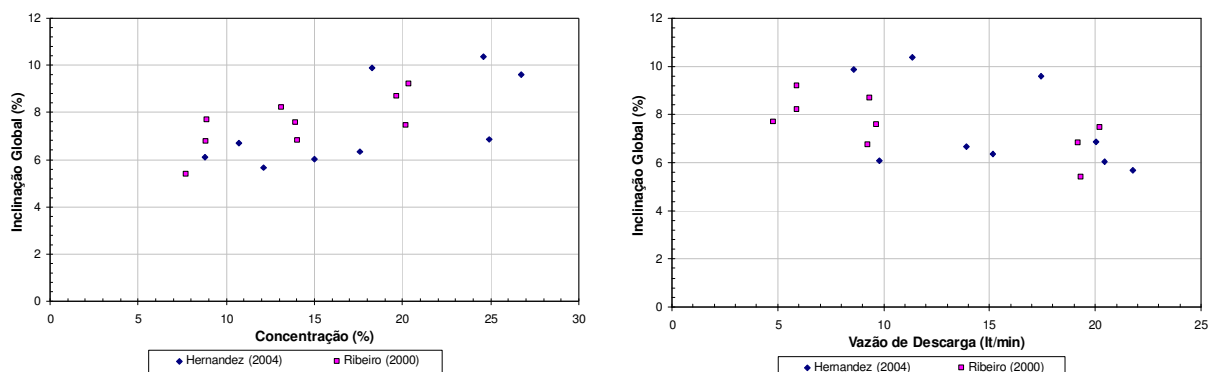
(f) Variação da H para várias Q ( $C \approx 25\%$ )

Figura 4.8 Variação da altura nominal média para as diferentes faixas de concentração e vazão para o rejeito de minério de ferro.

Da Figura 4.8, pode-se interpretar que o perfil de deposição apresenta uma tendência a ficar mais íngreme com o aumento da concentração. A redução da vazão gera um fenômeno similar. Estas duas condições são as que definem o poder transportador do fluxo. Na medida em que a concentração aumenta, para uma mesma vazão e uma mesma unidade de volume, a

capacidade de arraste da corrente diminui por dois motivos: o primeiro é a maior presença de sólidos em suspensão e o segundo é a diminuição da quantidade de água para a mesma unidade de volume. Estes dois elementos se combinam simultaneamente para a redução da capacidade do fluxo.

Este comportamento pode ser melhor observado na Figura 4.9 onde são plotados os dados de inclinação global (diferença de altura da praia sobre comprimento total) em função, tanto da concentração, quanto da vazão. Na Figura 4.9, adicionalmente aos dados obtidos no desenvolvimento do presente trabalho, foram acrescentados os dados apresentados por Ribeiro (2000). Observe-se que, na medida em que a concentração da lama é aumentada, a inclinação global da praia aumenta e, na medida em que a vazão diminui, a inclinação global também aumenta. Como discutido anteriormente, este fenômeno ocorre pela diminuição da capacidade de transporte da lama, fazendo com que os materiais se depositem mais perto do ponto de descarga, aumentando, assim, a inclinação global.



(a) Variação em função da Concentração

(b) Variação em função da Vazão

Figura 4.9 Variação da inclinação global da praia de deposição hidráulica no rejeito de minério de ferro: (a) Variação em função da concentração; (b) Variação em função da vazão.

Da Figura 4.9, também pode ser observado que os dados obtidos são consistentes com os apresentados na literatura para este mesmo material, em condições similares. Esta observação valida as análises feitas e permite a utilização destes resultados, em conjunto com os apresentados na literatura, para as análises que são apresentadas a seguir.

No trabalho de Melent'ev *et al.*, (1973), citado por Ribeiro (2000), os autores, ao considerar todos os efeitos que afetam a configuração da geometria das praias de aterros hidráulicos,

propuseram a existência de um perfil típico de equilíbrio, condicionado por todas as variáveis, mas independente da escala de ensaio. Desta forma, os autores consideram que este perfil pode ser descrito pela equação:

$$\frac{y}{H} = \left(1 - \frac{x}{L}\right)^n \quad (4.15)$$

sendo:

x e y: Abscissa e ordenada dos pontos que definem o perfil da praia de deposição;

L: Comprimento da praia;

H: Elevação máxima;

n: Parâmetro adimensional que depende da natureza do material e do método de deposição.

Outros autores como Smith *et al.* (1986), citado por Ribeiro (2000), mostram que o perfil da praia pode ser descrito por uma relação, não do tipo potencial como a apresentada por Melent'ev, e sim por uma expressão da forma exponencial. Nesta função define-se claramente o ponto de início da deposição ( $x = 0$ ), mas não se consegue definir o ponto final da praia com a superfície da lagoa de decantação ( $y = 0$ ). A função exponencial de Smith *et al.* (1986) é dada por:

$$\frac{y}{H} = \exp\left[-b \frac{x}{L}\right] \quad (4.16)$$

onde:

$b$  é uma constante que depende da natureza do material e do método de deposição.

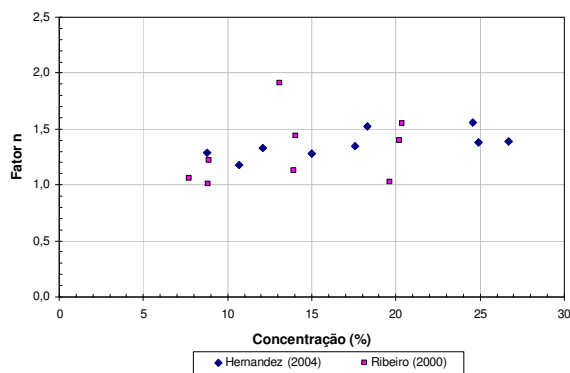
Para a obtenção dos parâmetros  $n$  e  $b$ , foi utilizada uma metodologia similar à empregada por Ribeiro (2000), mas, com uma variação metodológica no momento do ajuste do perfil. Inicialmente, foram construídos os gráficos de  $x/L$  versus  $y/H$  com os dados de laboratório. Posteriormente, foram determinadas curvas de ajuste, utilizando as Equações 4.15 e 4.16, para cada ponto  $x/L$  obtido em laboratório, tendo como ponto de partida valores arbitrários de  $n$  e de  $b$ . Com estes pontos e com os dados reais de laboratório, foram obtidas as somatórias das diferenças quadráticas entre o valor real e o valor estimado para cada  $x/L$  segundo a Equação 4.17. Posteriormente, por iterações sucessivas mudando os valores de  $n$  e  $b$ , foi determinado o valor mínimo desta diferença quadrática ( $\Delta_{y/H}^2$ ), sendo que, para  $\Delta_{y/H}^2 = 0$ , a

curva apresenta um ajuste perfeito com os dados de laboratório. Os resultados da estimativa dos valores de  $n$  e  $b$ , para cada um dos ensaios realizados, são apresentados na Figura 4.10.

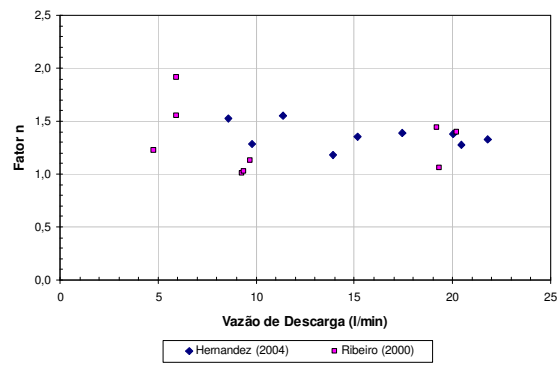
$$\Delta_{y/H}^2 = \sum_{x/L=0}^1 [(y/H)_{Real} - (y/H)_{Est}]^2 \quad (4.17)$$

sendo:

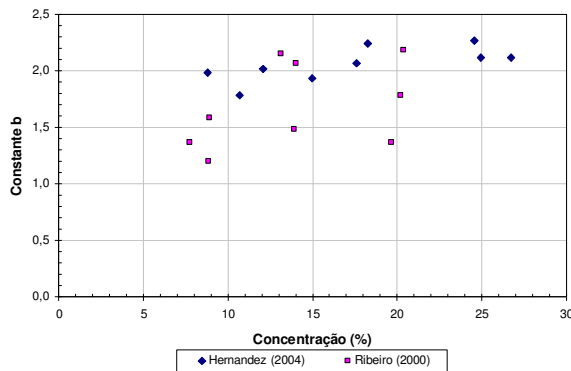
$\Delta_{y/H}^2$ : somatória das diferenças quadráticas entre o valor real e o valor estimado de  $y/H$  para cada ponto  $x/L$  do perfil.



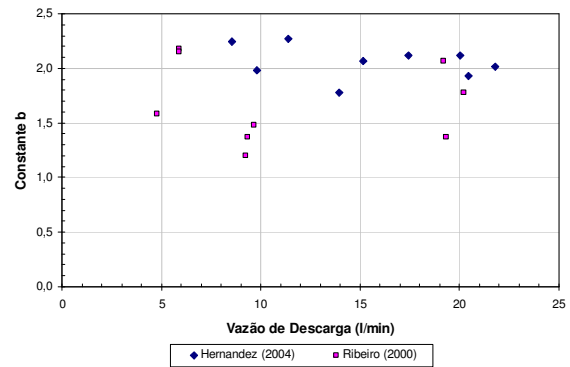
(a)  $n$  em função da Concentração



(b)  $n$  em função da Vazão



(c)  $b$  em função da Concentração



(d)  $b$  em função da Vazão

Figura 4.10 Variação dos parâmetros  $n$  e  $b$ : (a)  $n$  em função da concentração; (b)  $n$  em função da vazão; (c)  $b$  em função da concentração; (d)  $b$  em função da vazão;

Com a utilização do procedimento anteriormente descrito, foi possível a obtenção de valores de  $n$  e  $b$ , com um grau de dispersão menor que os apresentados por Ribeiro (2000). Esta apreciação pode ser feita da observação da Figura 4.10, onde são apresentados conjuntamente os resultados para o rejeito de minério de ferro da presente pesquisa e os obtidos por Ribeiro (2000).

Das Figuras 4.10a e 4.10c, é possível confirmar que existe uma tendência de aumento dos fatores  $n$  e  $b$  na medida em que a concentração aumenta (maior viscosidade), indicando um aumento na concavidade do depósito, como foi observado por Ribeiro (2000). No entanto, as Figuras 4.10b e 4.10d permitem observar uma tendência de decréscimo dos valores dos fatores  $n$  e  $b$  na medida em que a vazão aumenta, indicando que para vazões maiores, as praias de deposição hidráulica obtidas nos ensaios no ESDH tendem a apresentar concavidades menores.

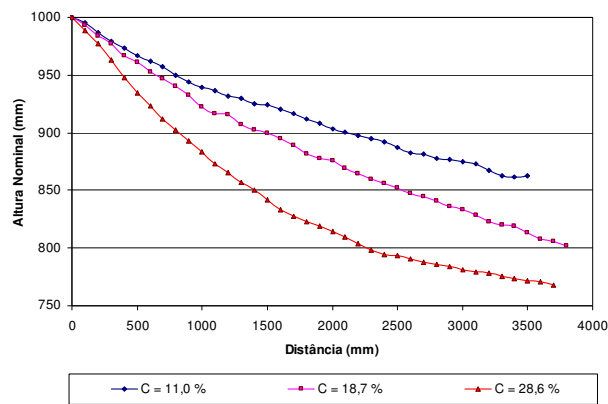
#### 4.3.1.2 Rejeito de minério de ouro

Nas Figuras 4.11a a 4.11c é apresentado o perfil de variação da altura nominal média em função da concentração para cada uma das faixas de vazões utilizadas nos ensaios realizados no material de rejeito de minério de ouro. Já as Figuras 4.11d a 4.11f apresentam a variação da altura nominal média em função da vazão para cada uma das faixas de concentração utilizadas nos ensaios realizados no rejeito de minério de ouro.

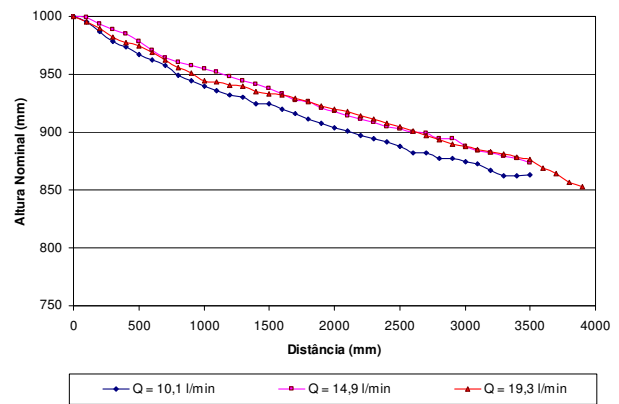
De forma similar ao observado no comportamento das praias do rejeito de minério de ferro, observando as Figuras 4.11a a 4.11c pode-se interpretar que o perfil de deposição apresenta uma tendência a ficar mais íngreme com o aumento da concentração. A redução da vazão gera um fenômeno similar. Estas duas condições são as que definem o poder transportador do fluxo. A Figura 4.12 apresenta os dados de inclinação global das praias, em função tanto da concentração quanto da vazão, confirmando que na medida em que a concentração da lama é aumentada, a inclinação global da praia aumenta, e, na medida em que a vazão diminui, a inclinação global também aumenta.

Para cada um dos ensaios realizados no rejeito de minério de ouro foram determinados os parâmetros  $n$  e  $b$  que definem o ajuste das Equações 4.15 e 4.16. Para a obtenção destes parâmetros foi utilizada a mesma metodologia empregada no tratamento dos dados de rejeito de minério de ferro. Inicialmente foram construídos os gráficos de  $x/L$  vs.  $y/H$  com os dados de laboratório. Posteriormente, foram determinadas curvas de ajuste e por iterações sucessivas, mudando os valores de  $n$  e  $b$ , foi minimizada a diferença quadrática entre a curva

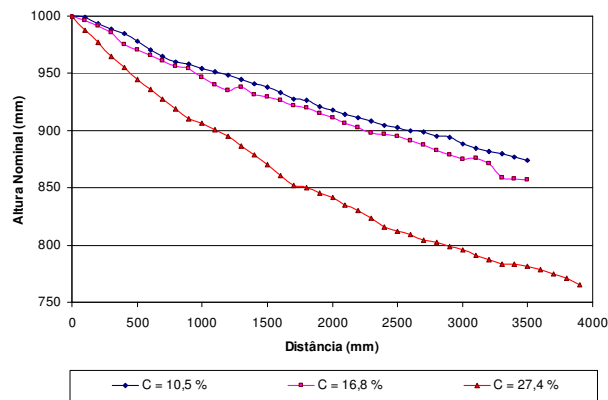
experimental e a de ajuste, obtendo assim os valores de  $n$  e  $b$ . Os resultados da estimativa dos valores de  $n$  e  $b$  são apresentados na Figura 4.13.



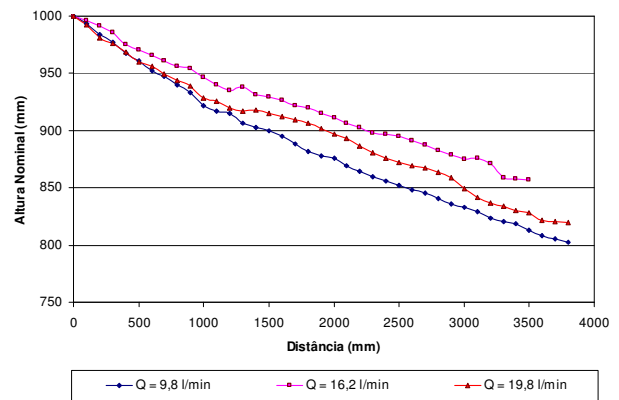
(a) Variação da  $h$  para várias  $C$  ( $Q \approx 10$  l/min)



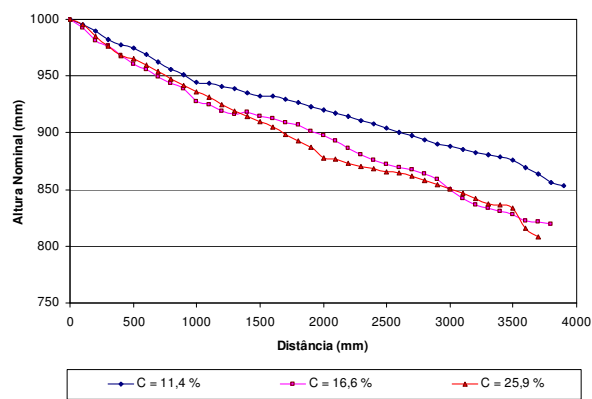
(d) Variação da  $h$  para várias  $Q$  ( $C \approx 10\%$ )



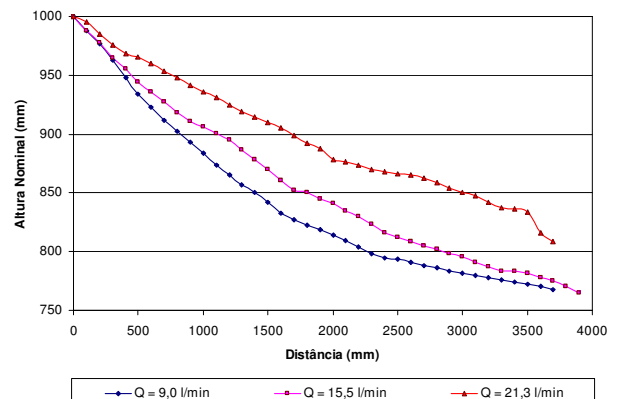
(b) Variação da  $h$  para várias  $C$  ( $Q \approx 15$  l/min)



(e) Variação da  $h$  para várias  $Q$  ( $C \approx 15\%$ )

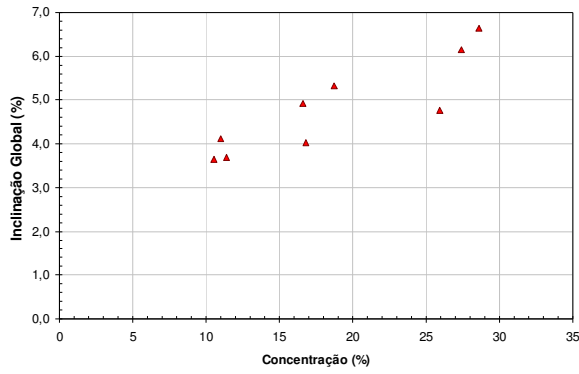


(c) Variação da  $h$  para várias  $C$  ( $Q \approx 20$  l/min)

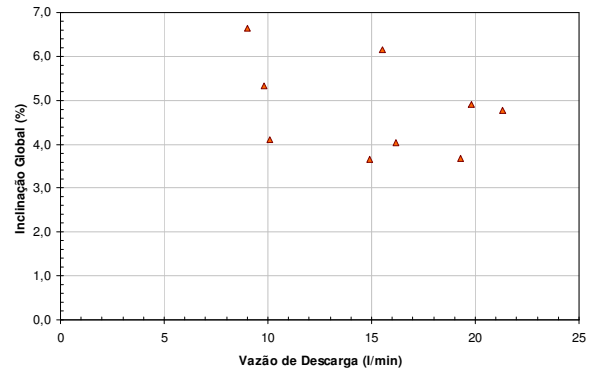


(f) Variação da  $h$  para várias  $Q$  ( $C \approx 25\%$ )

Figura 4.11 Variação da altura nominal média para as diferentes faixas de concentração e vazão para o rejeito de minério de ouro.

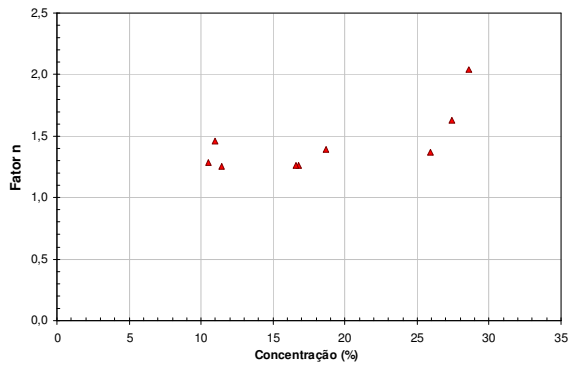


(a) Variação em função da Concentração

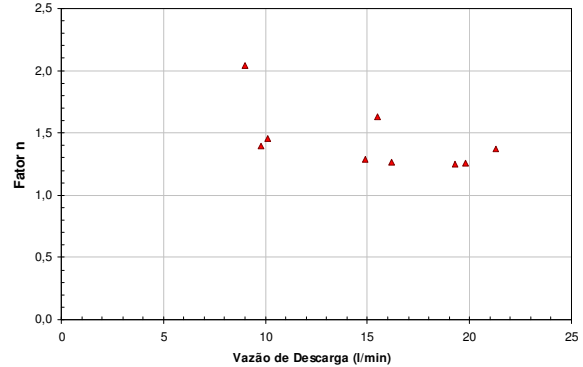


(b) Variação em função da Vazão

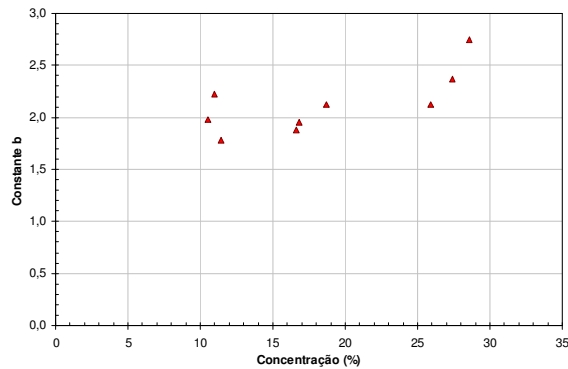
Figura 4.12 Variação da inclinação global da praia de deposição hidráulica no rejeito de minério de ouro: (a) Variação em função da concentração; (b) Variação em função da vazão.



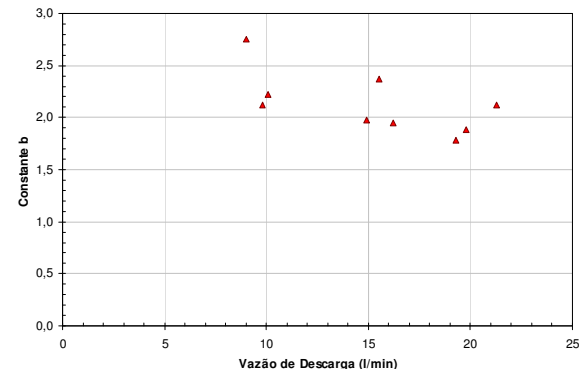
(a)  $n$  em função da Concentração



(b)  $n$  em função da Vazão



(c)  $b$  em função da Concentração



(d)  $b$  em função da Vazão

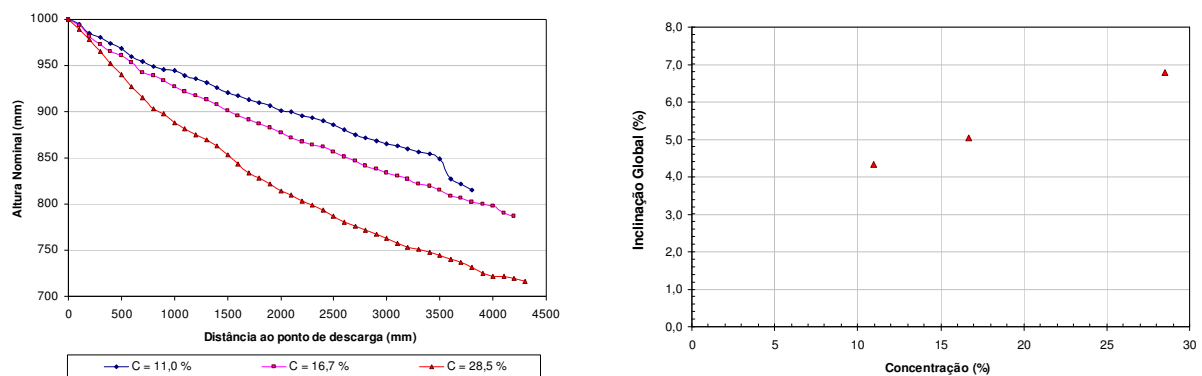
Figura 4.13 Variação dos parâmetros  $n$  e  $b$  das praias de rejeito de minério de ouro: (a)  $n$  em função da concentração; (b)  $n$  em função da vazão; (c)  $b$  em função da concentração; (d)  $b$  em função da vazão;



Na Figura 4.13 se observa que de forma similar ao rejeito de minério de ferro, as praias de rejeito de minério de ouro apresentam uma tendência de aumento dos fatores  $n$  e  $b$  na medida em que a concentração aumenta, indicando um aumento na concavidade do depósito. Igualmente se conclui que existe uma tendência de decréscimo dos valores dos fatores  $n$  e  $b$  na medida em que a vazão aumenta, uma lamina maior de fluxo por unidade de canal, assim para vazões maiores, as praias tendem a apresentar concavidades menores.

#### 4.3.1.3 Rejeito de minério de ouro ciclonado (*underflow*)

Para os ensaios realizados no material de rejeito de minério de ouro ciclonado pode-se observar na Figura 4.14 a variação da altura nominal ao longo das praias, assim como a inclinação global das praias em função da concentração. Da Figura 4.14 é possível perceber a influência da concentração na variação das condições geométricas das praias de deposição e fica evidente a relação entre o aumento da concentração e o incremento da inclinação das praias.



(a) Altura Nominal Média ( $Q \approx 15$  l/min)

(b) Inclinação Global

Figura 4.14 Variação das propriedades geométricas das praias de rejeito de minério de ouro ciclonado (*underflow*): (a) Altura nominal média ( $Q \approx 15$  l/min); (b) Inclinação global.

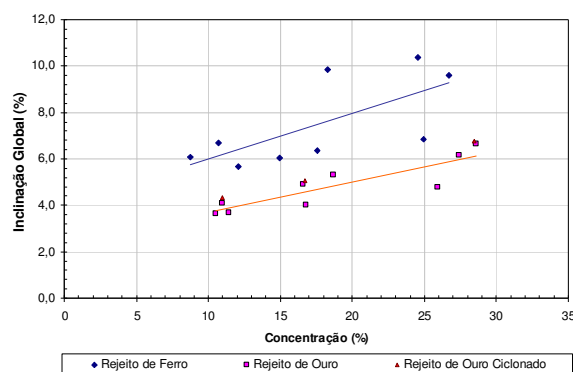
#### 4.3.1.4 Comparação dos resultados entre os diferentes materiais

A Tabela 4.5 apresenta um resumo dos valores de inclinação global das praias obtidas nos ensaios realizados nos três materiais estudados. A Figura 4.15 apresenta graficamente a relação entre a inclinação global das praias e as variáveis da deposição hidráulica. Pode-se observar como os valores de inclinação global dos ensaios realizados no rejeito de minério de

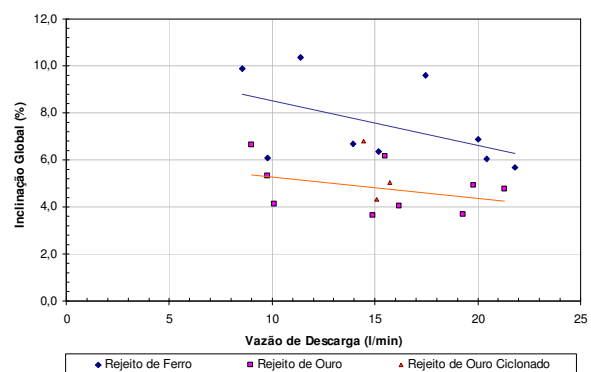
ferro são superiores aos obtidos com os materiais de rejeito de minério de ouro e rejeito de minério de ouro ciclonado, sendo os de rejeito de ouro ciclonado maiores que os de rejeito de ouro.

Tabela 4.5 Valores de inclinação global para cada um dos materiais ensaiados

Ensaio	Inclinação Global IG (%)		
	Rejeito de minério de ferro	Rejeito de minério de ouro	Rejeito de minério de ouro ciclonado ( <i>underflow</i> )
C10Q10	6,08	4,10	-
C10Q15	6,68	3,65	4,33
C10Q20	5,68	3,68	-
C15Q10	9,87	5,33	-
C15Q15	6,35	4,03	5,05
C15Q20	6,04	4,91	-
C25Q10	10,37	6,65	-
C25Q15	9,61	6,16	6,78
C25Q20	6,86	4,76	-



(a) Variação em função da Concentração



(b) Variação em função da Vazão

Figura 4.15 Variação da inclinação global da praia de deposição hidráulica para os três materiais estudados: (a) Variação em função da concentração; (b) Variação em função da vazão.

As retas de regressão, entre a inclinação global (IG) e as variáveis da deposição hidráulica, para os materiais de rejeito de minério de ferro e de ouro, representadas na Figura 4.15, diferenciam claramente o comportamento que esta propriedade tem para cada um dos materiais. O rejeito de minério de ferro apresenta em média uma maior inclinação global, assim como uma mudança na IG de 0,20% por cada incremento de 1% na concentração,

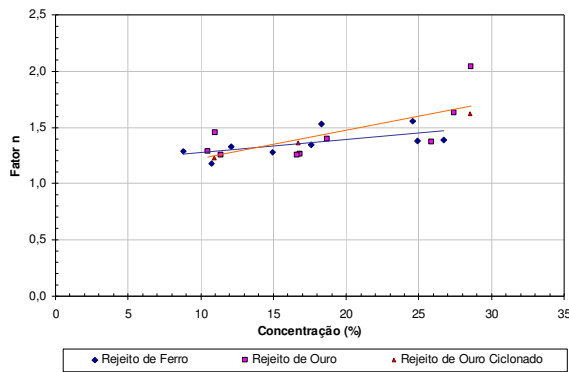
enquanto que a IG do rejeito de ouro tem, para cada incremento de 1% na concentração, um aumento de 0,13%. Assim, para o mesmo incremento na concentração da lama a inclinação global das praias de rejeito de ferro aumenta em média 53% mais que a inclinação global das praias de rejeito de ouro.

Quando analisada a Figura 4.15b, que representa a relação entre a inclinação global e a vazão de descarga, chega-se a uma conclusão similar. Para cada litro por minuto que diminui a vazão, a IG das praias de rejeito de ferro se incrementa em 0,19%, enquanto que nas praias de rejeito de ouro o acréscimo da IG é de 0,09%.

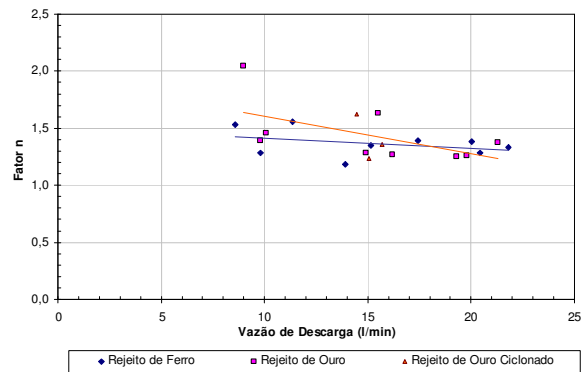
Os resultados do fator  $n$  e da constante  $b$ , do perfil típico das praias, para os três materiais estudados, são apresentados na Tabela 4.6. Para uma melhor interpretação, os valores obtidos destes parâmetros são apresentados graficamente em conjunto na Figura 4.16. Ao se observarem as linhas de melhor ajuste para o material de rejeito de minério de ferro e de rejeito de minério de ouro, observa-se como as praias de rejeito de ouro apresentam uma tendência a ficar mais côncavas ao se incrementar a concentração ou ao se diminuir a vazão de descarga, se comparadas com as praias conformadas pelo rejeito de ferro.

Tabela 4.6 Valores dos parâmetros  $n$  e  $b$  de ajuste das relações Melent'EV e Smith para cada um dos materiais ensaiados

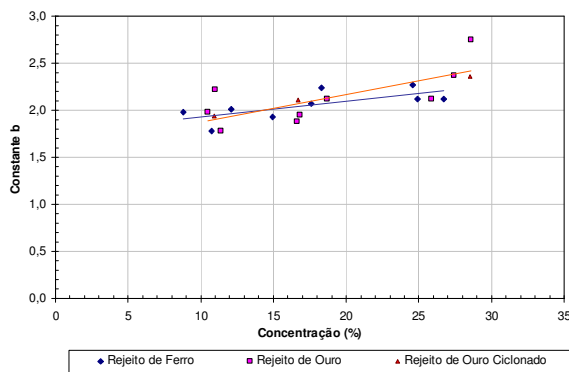
Ensaio	Material					
	Rejeito de minério de ferro		Rejeito de minério de ouro		Rejeito de minério de ouro ciclonado ( <i>underflow</i> )	
	Fator $n$	Constante $b$	Fator $n$	Constante $b$	Fator $n$	Constante $b$
C10Q10	1,29	1,98	1,46	2,22	-	-
C10Q15	1,18	1,78	1,29	1,98	1,23	1,94
C10Q20	1,33	2,01	1,25	1,78	-	-
C15Q10	1,53	2,25	1,39	2,12	-	-
C15Q15	1,35	2,07	1,26	1,95	1,36	2,11
C15Q20	1,28	1,93	1,26	1,88	-	-
C25Q10	1,55	2,27	2,04	2,75	-	-
C25Q15	1,39	2,12	1,63	2,37	1,62	2,36
C25Q20	1,38	2,12	1,37	2,12	-	-



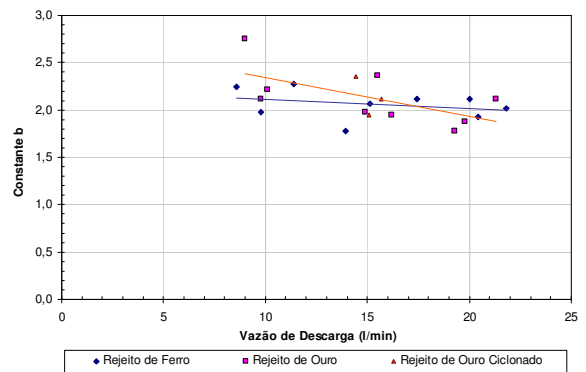
(a)  $n$  em função da concentração



(b)  $n$  em função da vazão



(c)  $b$  em função da concentração



(d)  $b$  em função da vazão

Figura 4.16 Variação dos parâmetros  $n$  e  $b$  das praias de deposição hidráulica para os três materiais estudados: (a)  $n$  em função da concentração; (b)  $n$  em função da vazão; (c)  $b$  em função da concentração; (d)  $b$  em função da vazão.

O comportamento geométrico das praias conformadas pelo rejeito de ouro ciclonado é muito similar ao apresentado pelas praias obtidas com o rejeito de ouro não ciclonado. O fator  $n$  e a constante  $b$  obtidos para estas praias localizam-se na mesma faixa de valores que os obtidos para o caso do material não ciclonado, não se observando uma diferença substancial nesta característica das praias em função da natureza dos materiais.

#### 4.3.2 Peso Específico Seco

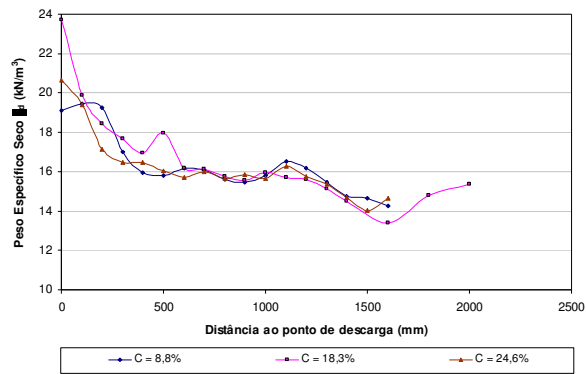
O conhecimento do peso específico seco e sua distribuição no espaço é um dos fatores fundamentais no estudo do comportamento de materiais geotécnicos. É sabido que o conhecimento do peso específico do material tem relação direta com outras propriedades importantes como resistência, índice de vazios e permeabilidade. Devido a estas observações ao longo da praia foi realizada uma amostragem discreta com o objetivo de avaliar a

distribuição do peso específico na extensão da praia e determinar como esta importante propriedade geotécnica se comporta com as mudanças nas variáveis que condicionam o processo de deposição hidráulica.

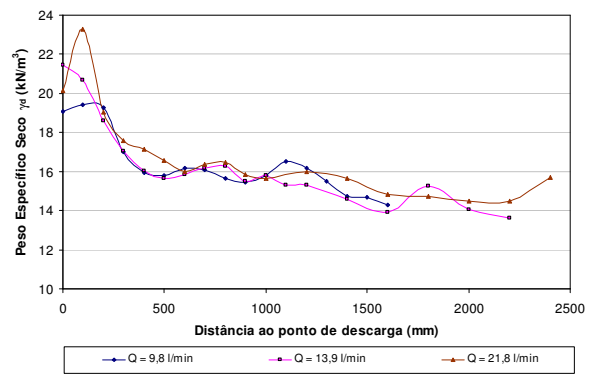
#### 4.3.2.1 Rejeito de minério de ferro

A Figura 4.17 apresenta a variação do peso específico seco do rejeito de minério de ferro assentado no processo de deposição hidráulica. Pode-se observar que nos primeiros 500 mm apresenta-se uma drástica redução do peso específico seco do material, passando de  $21,0 \text{ kN/m}^3$ , em média no ponto de descarga, para  $16,0 \text{ kN/m}^3$ . Esta redução representa uma perda de 24% no peso específico seco do material, influenciando de forma significativa o comportamento de outras variáveis geotécnicas. Após os 500 mm, o peso específico seco se estabiliza em torno de  $16 \text{ kN/m}^3$ , e permanece nesta faixa até aproximadamente uma distância de 1500 mm. A partir deste ponto, o peso específico seco apresenta uma queda lenta até o final da praia.

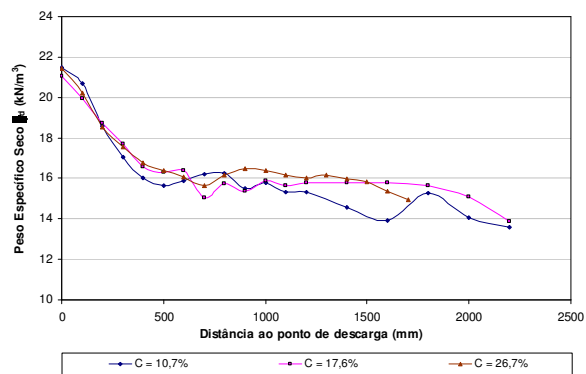
O comportamento apresentado pelo peso específico seco do rejeito de minério de ferro é influenciado pelo processo de segregação hidráulica deste material. A grande diferença no peso específico das partículas sólidas dos minerais que fazem parte do rejeito faz com que partículas mais densas e com um menor volume se depositem mais perto do ponto de descarga. Na seqüência, inicia-se uma transição entre este tipo de partículas e as que apresentam uma massa menor e um volume maior. Finalmente são depositadas as partículas com menor peso específico e menor volume. Este fenômeno fica mais evidente quando são estudadas as amostras coletadas em função da granulometria do material e do peso específico das partículas ou do conteúdo de ferro.



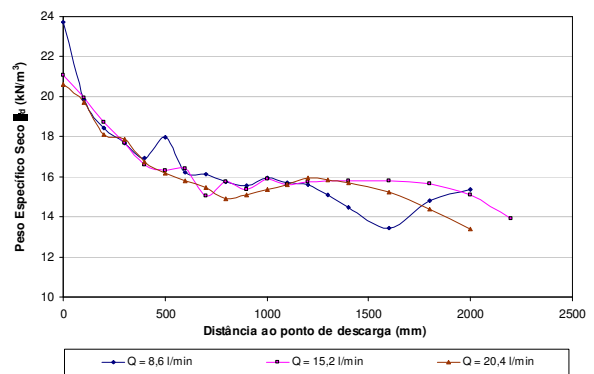
(a) Variação de  $\gamma_d$  para várias C ( $Q \approx 10$  l/min)



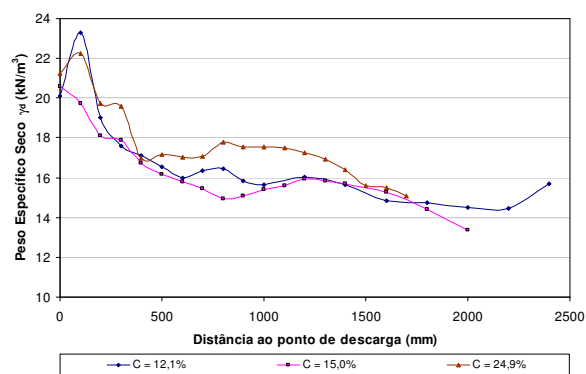
(d) Variação de  $\gamma_d$  para várias Q ( $C \approx 10\%$ )



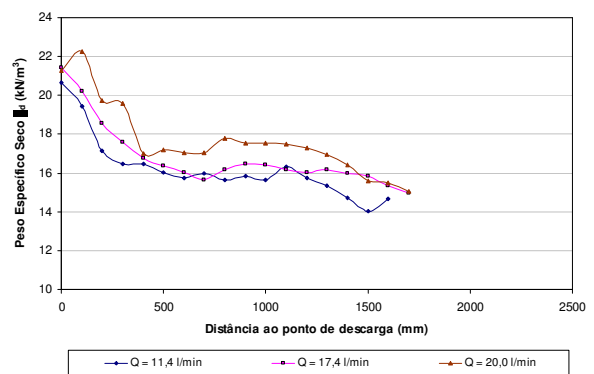
(b) Variação de  $\gamma_d$  para várias C ( $Q \approx 15$  l/min)



(e) Variação de  $\gamma_d$  para várias Q ( $C \approx 15\%$ )



(c) Variação de  $\gamma_d$  para várias C ( $Q \approx 20$  l/min)



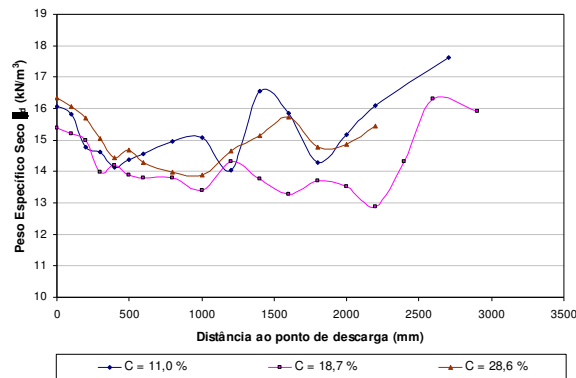
(f) Variação de  $\gamma_d$  para várias Q ( $C \approx 25\%$ )

Figura 4.17 Variação do peso específico seco para as diferentes faixas de concentração e de vazão para o rejeito de minério de ferro.

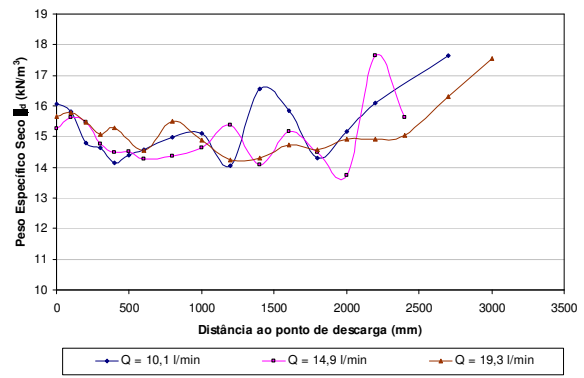
#### 4.3.2.2 Rejeito de minério de ouro

A variação do peso específico seco do rejeito de minério de ouro é apresentada na Figura 4.18. Observa-se uma redução de 17% no valor do peso específico seco nos primeiros 500 mm. Após os 1500mm o peso específico seco não apresenta um padrão típico de

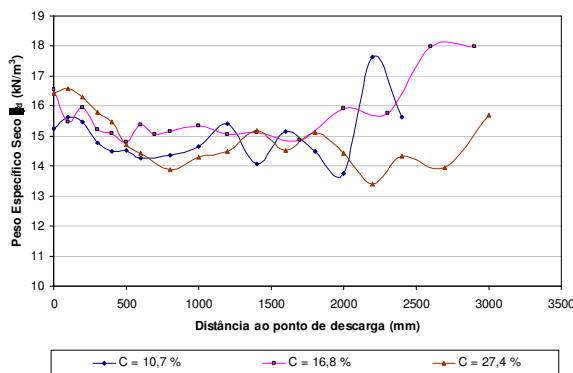
comportamento. Estas variações no valor do  $\gamma_d$  podem estar relacionadas às dificuldades de amostragem nas regiões finais do depósito devido a uma maior quantidade de água ainda existente nestas regiões. O comportamento do peso específico seco do rejeito está diretamente associado ao processo de segregação hidráulica do material que ocorre durante o transporte hidráulico



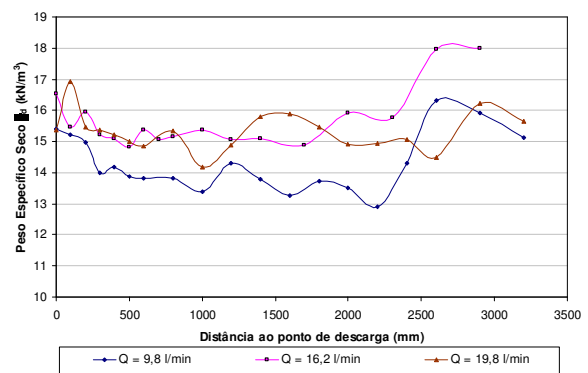
(a) Variação de  $\gamma_d$  para várias C ( $Q \approx 10 \text{ l/min}$ )



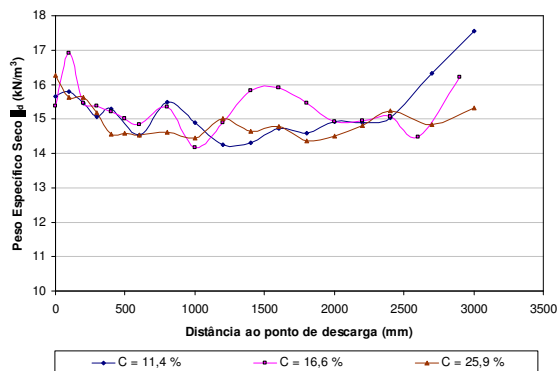
(d) Variação de  $\gamma_d$  para várias Q ( $C \approx 10\%$ )



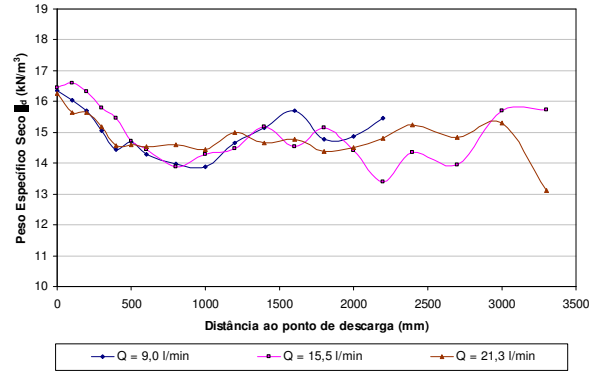
(b) Variação de  $\gamma_d$  para várias C ( $Q \approx 15 \text{ l/min}$ )



(e) Variação de  $\gamma_d$  para várias Q ( $C \approx 15\%$ )



(c) Variação de  $\gamma_d$  para várias C ( $Q \approx 20 \text{ l/min}$ )



(f) Variação de  $\gamma_d$  para várias Q ( $C \approx 25\%$ )

Figura 4.18 Variação do peso específico seco para as diferentes faixas de concentração e de vazão para o rejeito de minério de ouro.

#### 4.3.2.3 Rejeito de minério de ouro ciclonado (*underflow*)

A Figura 4.19 apresenta a variação do peso específico seco para os ensaios de deposição realizados com o material de rejeito de ouro ciclonado. Da figura é possível observar que para este material não se apresenta claramente a variação do peso específico ao longo das praias. Para os três ensaios realizados o peso específico apresenta uma média de  $15,0 \text{ kN/m}^3$ , com desvio padrão de  $1,7 \text{ kN/m}^3$ .

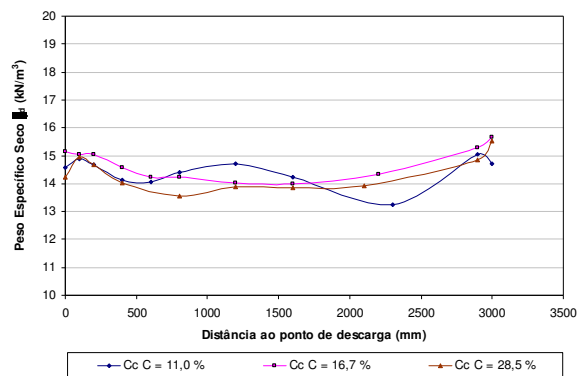


Figura 4.19 Variação do peso específico seco ao longo da praia em função da concentração para uma vazão de 15 l/min para o rejeito de minério de ouro ciclonado (*underflow*).

#### 4.3.2.4 Comparação dos resultados entre os diferentes materiais

A Figura 4.20 apresenta a variação do peso específico seco ao longo da praia de deposição para cada um dos materiais estudados. Pode-se observar que o peso específico seco médio do rejeito de minério de ouro não ciclonado é, em média, 5,5% superior ao peso específico seco médio do rejeito de minério de ouro ciclonado. Devido às suas propriedades mineralógicas e granulométricas, o peso específico seco médio do rejeito de minério de ferro apresenta um comportamento totalmente diferente do apresentado pelos rejeitos de minério de ouro.



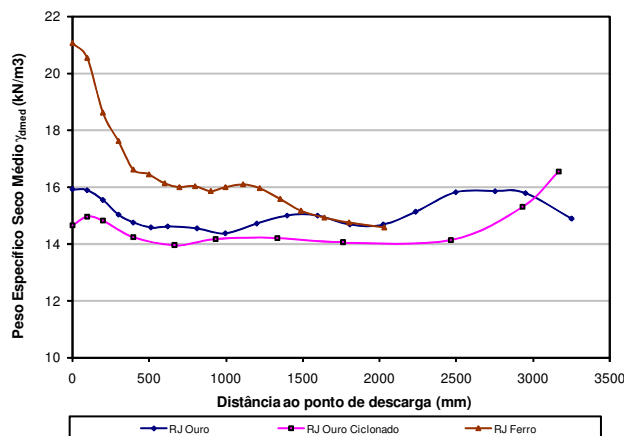


Figura 4.20 Variação do peso específico seco ao longo da praia para os três materiais estudados.

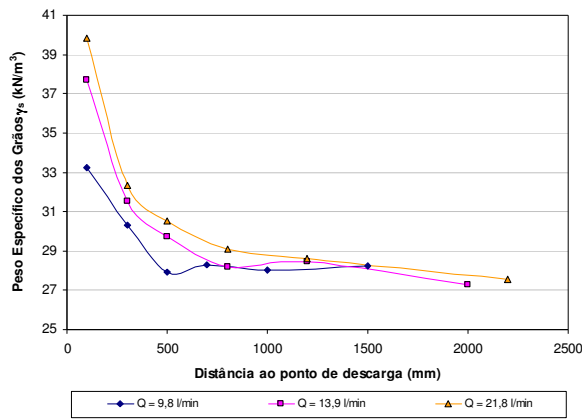
### 4.3.3 Peso específico dos grãos

Considerando a presença de diversos minerais nos rejeitos de minério de ferro e de ouro, fez-se necessária a determinação da variação do peso específico das partículas ao longo do depósito. A adoção deste tipo de análise é necessária para melhor entender o que acontece durante o processo de segregação hidráulica, no qual a presença de diversos minerais no rejeito confere a estes materiais um caráter particular de segregação, em que não só o peso ou o diâmetro definem o local de deposição da partícula, mas resulta dos efeitos combinados de ambos os parâmetros no processo de segregação hidráulica dos rejeitos.

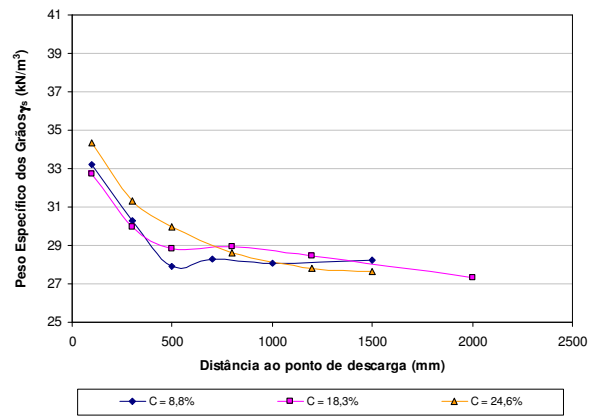
#### 4.3.3.1 Rejeito de minério de ferro

Considerando a física do processo de deposição hidráulica em que o mecanismo de segregação ocorre pela ação do transporte hidráulico, verifica-se que as características da partícula em relação a seu peso e seu diâmetro definirão as suas condições de deposição. No caso de materiais homogêneos, como a areia de quartzo, o diâmetro das partículas governará o processo de segregação hidráulica. Materiais não homogêneos, como o rejeito de minério de ferro, apresentam um processo de segregação hidráulica marcado pela importância do peso específico dos grãos. Neste caso a presença de diversos minerais com peso específico dos grãos diferentes, faz com que a combinação destas duas propriedades seja o elemento chave para o entendimento do processo de segregação. As Figuras 4.21a a 4.21c apresentam a

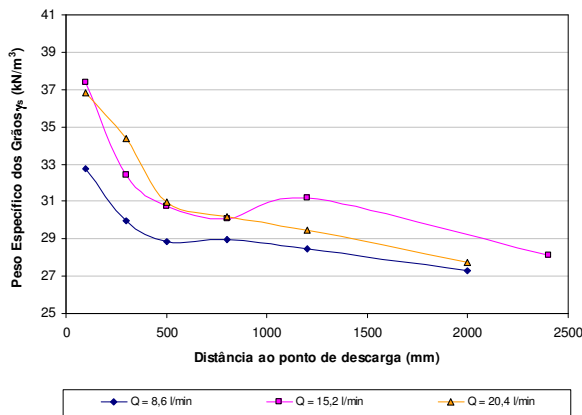
variação do peso específico dos grãos como uma função da vazão para cada concentração estudada.



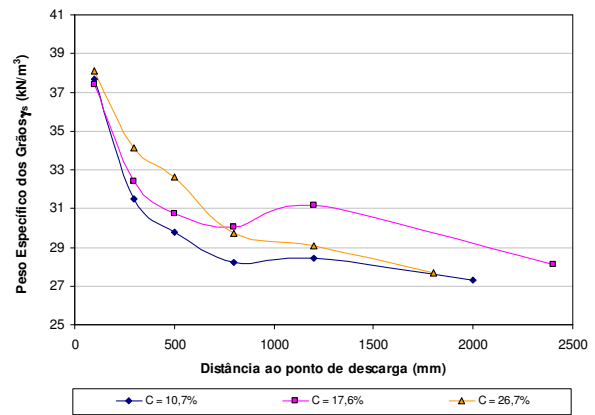
(a) Concentração  $C \approx 10\%$



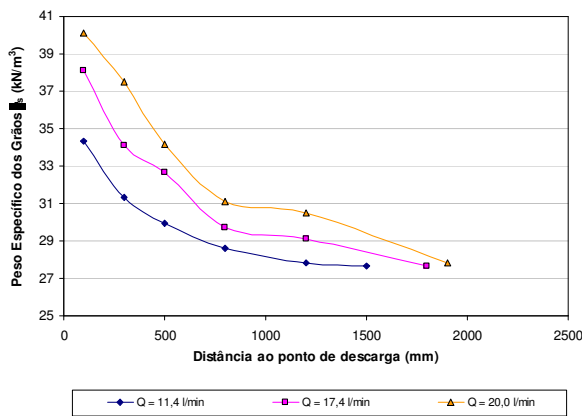
(d) Vazão  $Q \approx 10 \text{ l/min}$



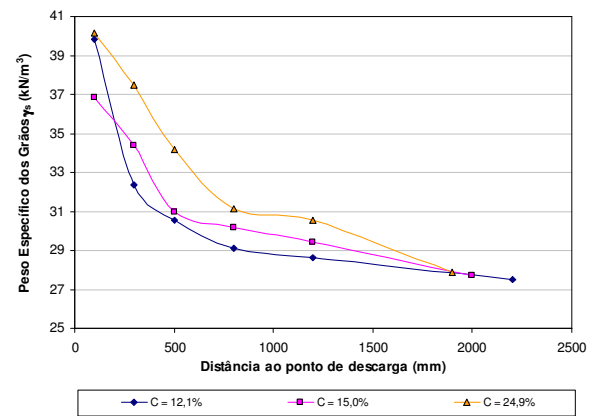
(b) Concentração  $C \approx 15\%$



(e) Vazão  $Q \approx 15 \text{ l/min}$



(c) Concentração  $C \approx 25\%$



(f) Vazão  $Q \approx 20 \text{ l/min}$

Figura 4.21 Variação do peso específico dos grãos ao longo da praia em função da concentração e da vazão para o rejeito de minério de ferro.

As Figuras 4.21d a 4.21f apresentam a relação entre o peso específico dos grãos como uma função da concentração para cada vazão simulada nos ensaios. A Figura 4.22 mostra a variação, ao longo do canal, da média dos valores do peso específico dos grãos de todos os ensaios realizados para este material.

Observe-se das Figuras 4.21a a 4.21c como o peso específico dos grãos é maior nas proximidades do ponto de descarga, com valores que podem chegar a até  $40,1 \text{ kN/m}^3$ , e com média de  $36,7 \text{ kN/m}^3$  para todos os ensaios realizados. Em relação ao ponto de descarga, o peso específico dos grãos diminui rapidamente nos primeiros 800 mm, apresentando uma redução média de 20%. No comprimento restante da praia, a redução é mais gradativa, chegando a apresentar um peso específico dos grãos médio de  $27,7 \text{ kN/m}^3$ , a aproximadamente 2m do ponto de descarga, o que representa uma redução média de 5,6% nos 1200 mm finais das praias. Estas observações permitem evidenciar a importância do processo de segregação hidráulica nas mudanças das propriedades dos rejeitos depositados.

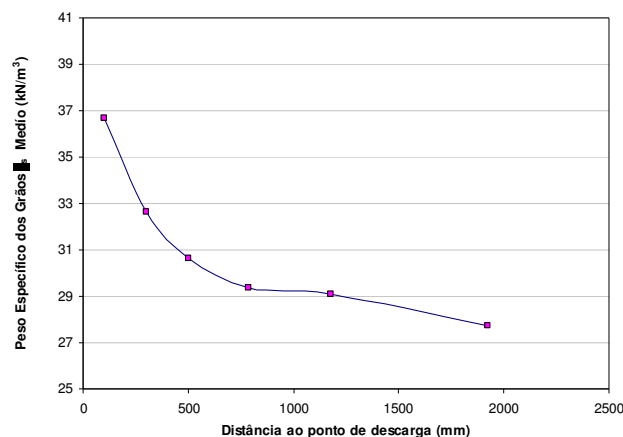


Figura 4.22 Variação da média dos valores de peso específico dos grãos de todos os ensaios realizados no rejeito de minério de ferro.

Na medida em que a concentração aumenta, o poder de transporte da mistura água-rejeito diminui. Este fenômeno pode ser observado ao estudar mais detalhadamente a Figura 4.21. Na Figura 4.21<sup>a</sup>, pode-se observar que os perfis do peso específico dos grãos, para uma concentração aproximada de 10%, se apresentam praticamente juntos, apresentando pouca diferença entre eles ao aumentar a vazão de descarga. Na Figura 4.21c, que representa os perfis do peso específico dos grãos para uma concentração aproximada de 25%, é possível observar claramente como o aumento da vazão influencia o perfil do peso específico dos

grãos. Isto se explica devido ao fato de que, em condições de baixa concentração, um aumento da vazão não implica em mudanças consideráveis do poder de transporte do fluido; por outro lado, quando a concentração é alta, as mudanças na vazão refletem um ganho real no poder de transporte do fluido, aumentando os efeitos da segregação hidráulica nos depósitos obtidos.

O peso específico dos grãos é uma propriedade altamente influenciada pela vazão de descarga como pode ser observado nas Figuras 4.21d a 4.21f. Observe-se como para uma vazão aproximada de 10 l/min o peso específico a 10 mm do ponto de descarga apresenta uma média de 33,4 kN/m<sup>3</sup>. Já no caso de uma vazão aproximada de 15 l/min o peso específico a 10 mm do ponto de descarga tem uma média de 37,7 kN/m<sup>3</sup>. Por último, para uma vazão aproximada de 20 l/min tem-se um peso específico dos grãos de 38,9 kN/m<sup>3</sup>. Estas mudanças no peso específico dos grãos representam incrementos de 12,8% ao se passar de 10 para 15 l/min e de 3,2% quando a vazão de descarga varia entre 15 e 20 l/min.

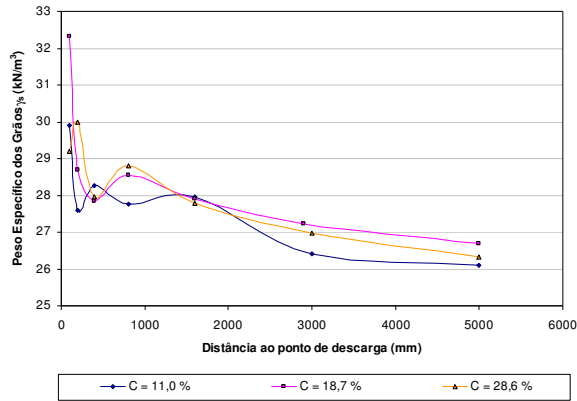
#### 4.3.3.2 Rejeito de minério de ouro

A Figura 4.23 apresenta a variação do peso específico dos grãos em função da vazão e da concentração para os ensaios realizados neste material. A Figura 4.24 apresenta a variação da média dos valores do peso específico dos grãos ao longo do canal de todos os ensaios realizados no rejeito de minério de ouro.

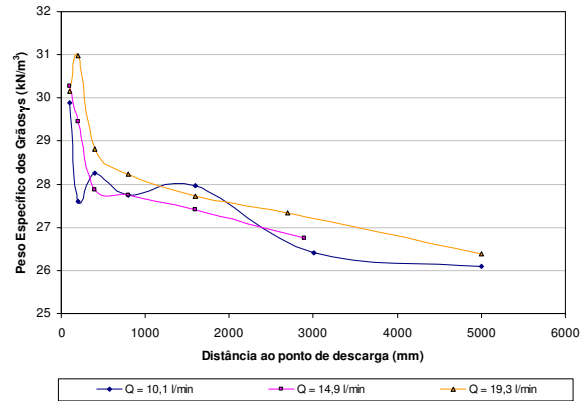
As curvas apresentadas nas Figuras 4.23a a 4.21c mostram, de forma similar ao rejeito de minério de ferro, que o peso específico dos grãos é maior nas proximidades do ponto de descarga, com valor máximo de 32,3 kN/m<sup>3</sup>, e média de 30,3 kN/m<sup>3</sup>. Na medida em que se afasta do ponto de descarga o peso específico dos grãos diminui nos primeiro 1000 mm (redução média de 8%). Na porção restante da praia a redução é mais suave, com peso específico dos grãos médio de 26,9 kN/m<sup>3</sup> a 3000 mm do ponto de descarga (redução média de 5,6%). A lama acumulada perto do sistema de drenos no final do canal, a 5000 mm do ponto de descarga, apresenta em média um peso específico dos grãos de 26,4 kN/m<sup>3</sup>.

Da Figura 4.24 pode-se observar a redução do peso específico dos grãos ao longo da praia. Perto do ponto de descarga se apresentam os maiores valores do peso específico, nos

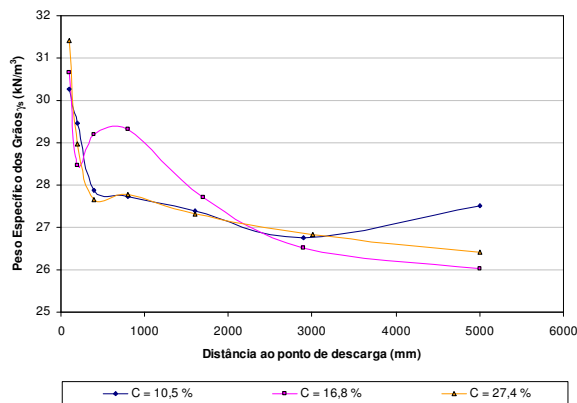
primeiros milímetros a redução da propriedade é acentuada, após o primeiro metro a redução é gradual até chegar ao final da praia. Este comportamento influencia as outras propriedades geotécnicas dos depósitos, em especial, o peso específico seco.



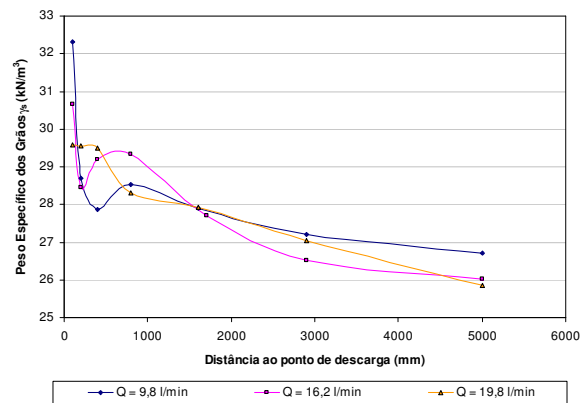
(a) Variação de  $\gamma_s$  para várias C ( $Q \approx 10$  l/min)



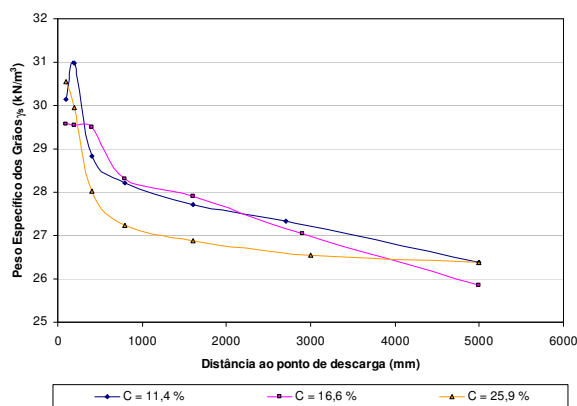
(d) Variação de  $\gamma_s$  para várias Q ( $C \approx 10\%$ )



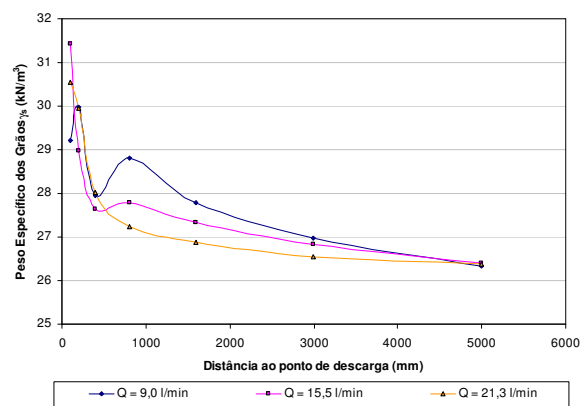
(b) Variação de  $\gamma_s$  para várias C ( $Q \approx 15$  l/min)



(e) Variação de  $\gamma_s$  para várias Q ( $C \approx 15\%$ )



(c) Variação de  $\gamma_s$  para várias C ( $Q \approx 20$  l/min)



(f) Variação de  $\gamma_s$  para várias Q ( $C \approx 25\%$ )

Figura 4.23 Variação do peso específico dos grãos para as diferentes faixas de concentração e de vazão para o rejeito de minério de ouro.

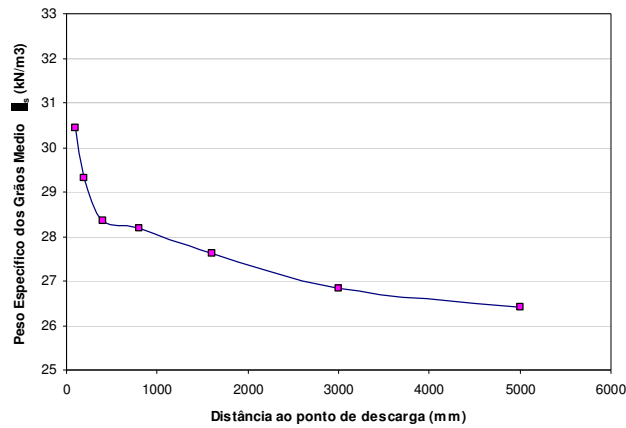
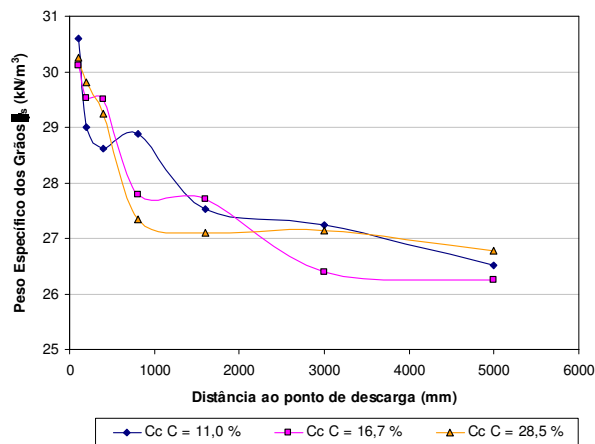


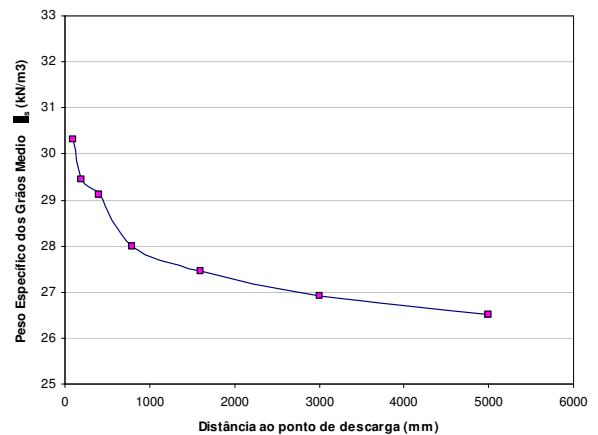
Figura 4.24 Variação da média dos valores de peso específico dos grãos de todos os ensaios realizados no rejeito de minério de ouro.

#### 4.3.3.3 Rejeito de minério de ouro ciclonado (*underflow*)

A Figura 4.25 apresenta a variação do peso específico dos grãos para os ensaios realizados no rejeito de minério de ouro ciclonado. Na Figura 4.25a pode-se observar a variação do peso específico dos grãos em função da concentração para os três ensaios realizados em este material. Já a Figura 4.25b apresenta a variação média desta propriedade.



(a) Vazão  $Q \approx 15$  l/min



(b) Peso Específico Médio

Figura 4.25 Variação do peso específico dos grãos ao longo da praia em função da concentração para o rejeito de minério de ouro ciclonado (*underflow*): (a) Vazão  $Q \approx 15$  l/min; (b) Peso específico médio.

#### 4.3.3.4 Comparação dos resultados entre os diferentes materiais

A Figura 4.26 apresenta a variação dos valores médios do peso específico dos grãos para os três materiais estudados. Da figura é possível observar a influência da mineralogia de cada um dos rejeitos nesta propriedade. A uma distância de 10 mm do ponto de descarga os rejeitos de minério de ouro apresentam um peso específico dos grãos médio de  $30,3 \text{ kN/m}^3$ , enquanto que o rejeito de minério de ferro apresenta um peso específico dos grãos médio de  $36,7 \text{ kN/m}^3$ . A influência do processo de deposição hidráulica é maior nas praias de rejeito de minério de ferro devido à composição mineralógica deste material.

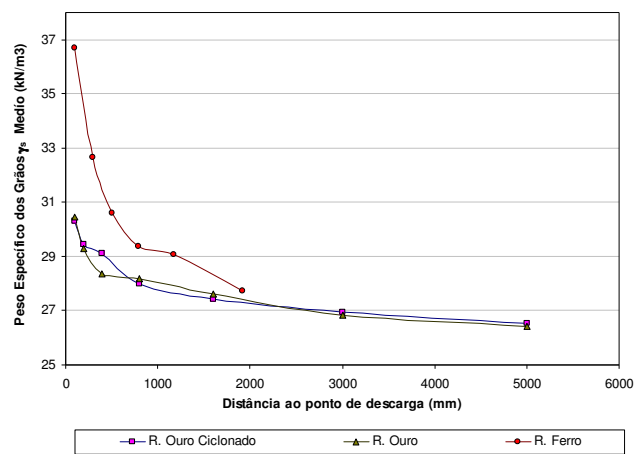


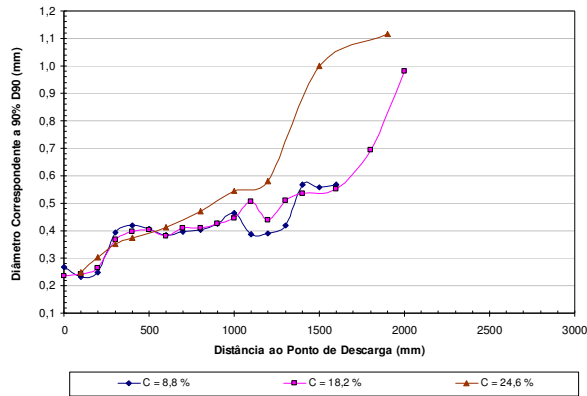
Figura 4.26 Variação da média dos valores de peso específico dos grãos para os três materiais estudados.

#### 4.3.4 Granulometria ou Segregação Hidráulica

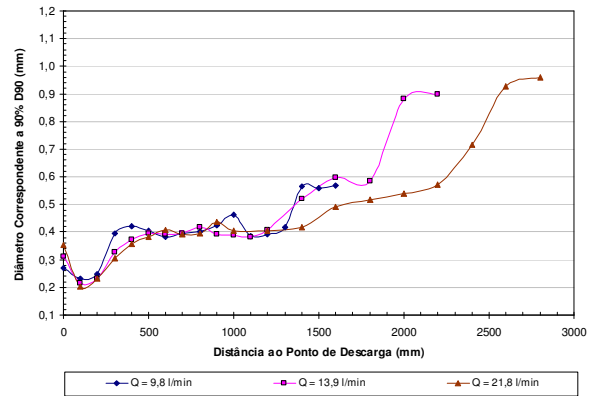
O processo de segregação hidráulica gerado na praia devido ao fenômeno de deposição foi avaliado a partir da determinação da distribuição granulométrica do rejeito ao longo do perfil de deposição. Assim, foram realizados ensaios de granulometria em algumas das amostras coletadas no ESDH. Os resultados dos ensaios granulométricos foram analisados de forma conjunta, considerando todas as amostras coletadas ao longo da praia nas diferentes concentrações e vazões simuladas no ESDH, para cada um dos materiais estudados. Neste sentido, foi avaliado o comportamento do diâmetro correspondente a 90% passante ( $D_{90}$ ), do diâmetro médio dos sedimentos ( $D_{50}$ ), do diâmetro efetivo ( $D_{10}$ ) e da porcentagem de material que passa na peneira # 200 (0,074 mm).

#### 4.3.4.1 Rejeito de minério de ferro

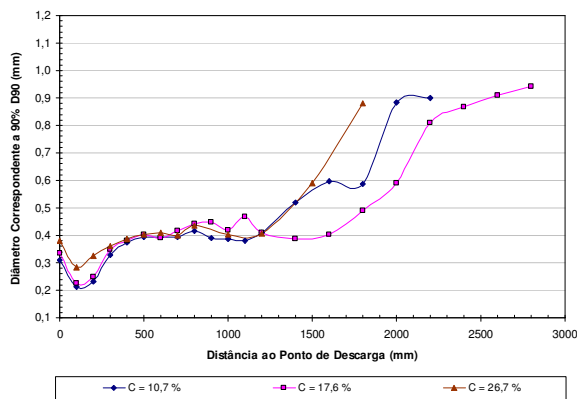
A Figura 4.27 apresenta a avaliação do comportamento do diâmetro correspondente a 90% passante ( $D_{90}$ ) das amostras do material de rejeito de ferro obtidas das praias de deposição hidráulica.



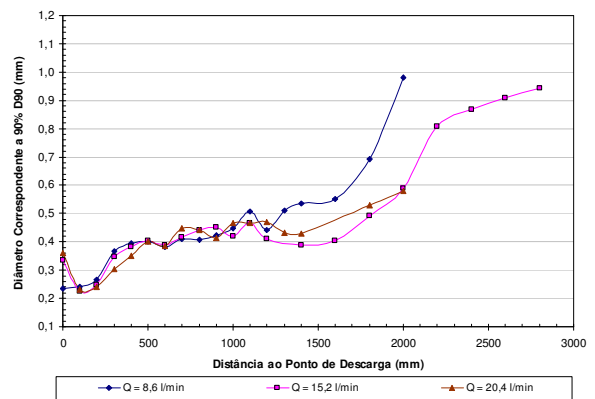
(a) Variação do  $D_{90}$  para várias C ( $Q \approx 10$  l/min)



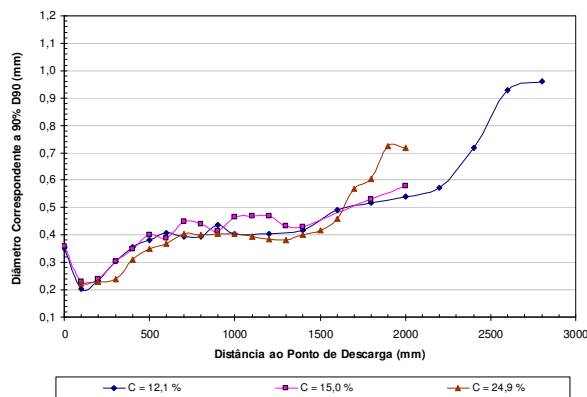
(d) Variação do  $D_{90}$  para várias Q ( $C \approx 10\%$ )



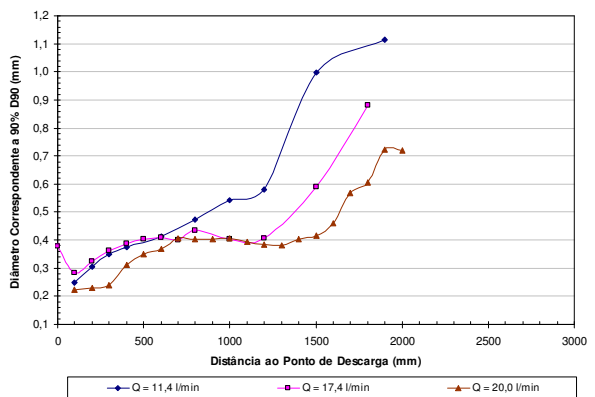
(b) Variação do  $D_{90}$  para várias C ( $Q \approx 15$  l/min)



(e) Variação do  $D_{90}$  para várias Q ( $C \approx 15\%$ )



(c) Variação do  $D_{90}$  para várias C ( $Q \approx 20$  l/min)



(f) Variação do  $D_{90}$  para várias Q ( $C \approx 25\%$ )

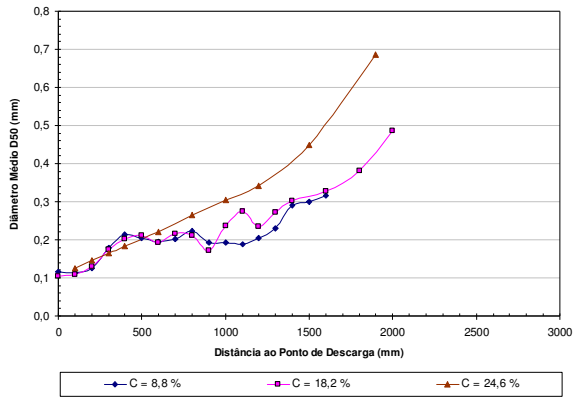
Figura 4.27 Variação do diâmetro correspondente a 90% ( $D_{90}$ ) para as diferentes faixas de concentração e vazão para o rejeito de minério de ferro.



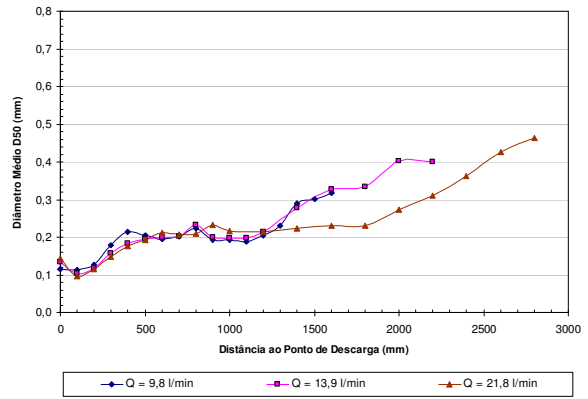
Observa-se da Figura 4.27, como, a 100 mm do ponto de descarga, apresentam-se os menores valores de  $D_{90}$ , com média de 0,234 mm. A partir deste ponto, o índice aumenta gradualmente até aproximadamente uma distância 1000 mm do ponto de descarga, onde apresenta um valor médio de 0,438 mm. A partir deste comprimento da praia e até o final, o incremento do  $D_{90}$ , é mais acentuado, apresentando ao final da praia os maiores valores de  $D_{90}$  em torno de 0,849 mm. Não é possível observar uma influência marcante das condições que controlam o processo de deposição hidráulica na variação deste índice.

A Figura 4.28 apresenta a variação do Diâmetro Médio dos sedimentos ( $D_{50}$ ). Perto do ponto de descarga, o Diâmetro Médio dos sedimentos apresenta um valor de 0,110 mm. A partir deste ponto, o incremento do  $D_{50}$  é aproximadamente constante ao longo da praia e influenciado pela vazão de descarga. Para uma vazão de descarga média de 10 l/min, o  $D_{50}$  varia a uma taxa média de 0,00018 mm/mm independentemente da concentração. Para uma vazão média de 25 l/min, a variação do Diâmetro Médio é de 0,00009 mm/mm. A taxa média de variação do  $D_{50}$  ao longo das praias de deposição variou 100%, quando comparadas as taxas de variação para 10 l/min e para 25 l/min. Para as mudanças da concentração na variação do  $D_{50}$ , não foi possível identificar uma influência marcante.

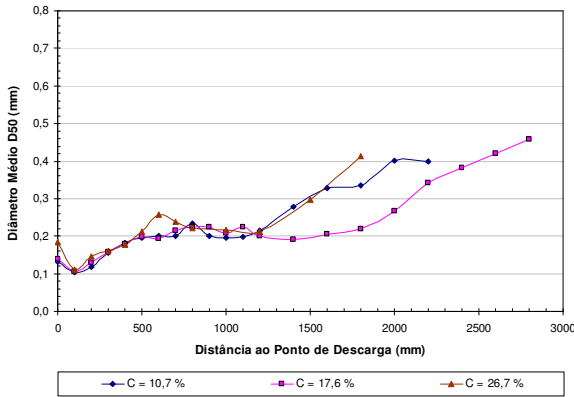
A Figura 4.29 apresenta a variação no Diâmetro Efetivo ( $D_{10}$ ) ao longo das praias de deposição em função da concentração e da vazão. O Diâmetro Efetivo, próximo ao ponto de descarga, possui um valor médio de 0,050 mm, que aumenta gradualmente até aproximadamente uma distância de 1500 mm do ponto de descarga. A partir deste ponto, a variação do  $D_{10}$  sofre um grande aumento. Similar ao observado com o Diâmetro Médio ( $D_{50}$ ), a influência da concentração na variação do  $D_{10}$  é evidente ao observar as Figuras 4.29a a 4.29c. A taxa média de variação do Diâmetro Efetivo passa de 0,2010 mm/mm, para os ensaios que apresentam vazão aproximada de 10 l/min, para uma taxa de variação do  $D_{10}$  de 0,1516 mm/mm, para os ensaios de deposição que apresentam uma vazão aproximada de 25 l/min. Esta mudança corresponde a uma redução de 32% na taxa de variação do  $D_{10}$ .



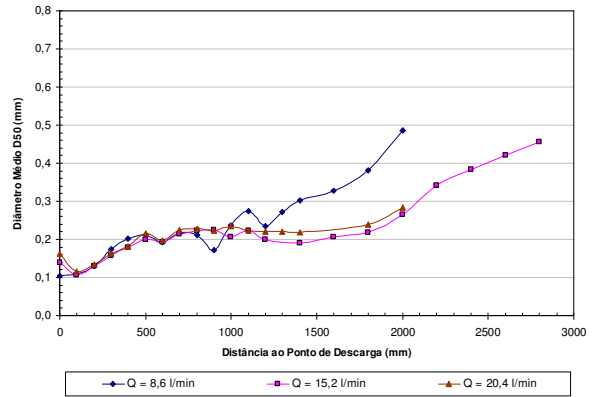
(a) Variação do  $D_{50}$  para várias C ( $Q \approx 10$  l/min)



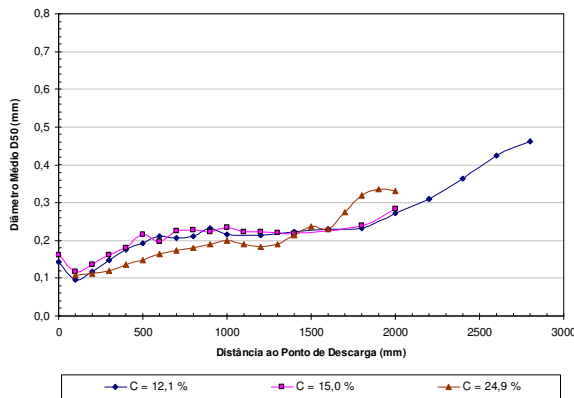
(d) Variação do  $D_{50}$  para várias Q ( $C \approx 10\%$ )



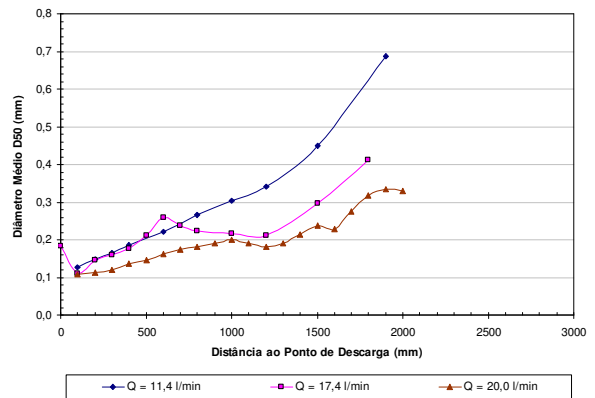
(b) Variação do  $D_{50}$  para várias C ( $Q \approx 15$  l/min)



(e) Variação do  $D_{50}$  para várias Q ( $C \approx 15\%$ )

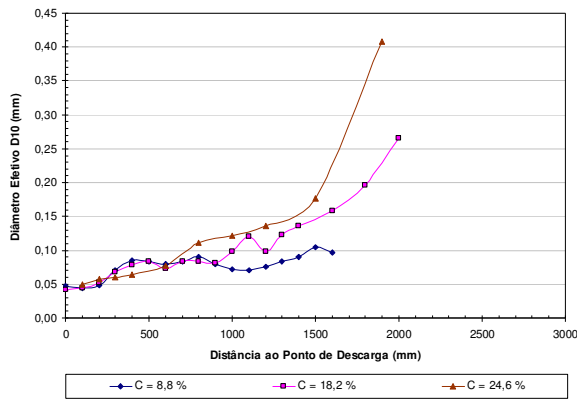


(c) Variação do  $D_{50}$  para várias C ( $Q \approx 20$  l/min)

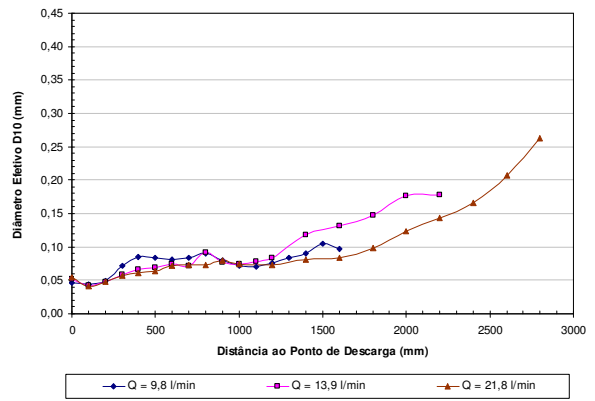


(f) Variação do  $D_{50}$  para várias Q ( $C \approx 25\%$ )

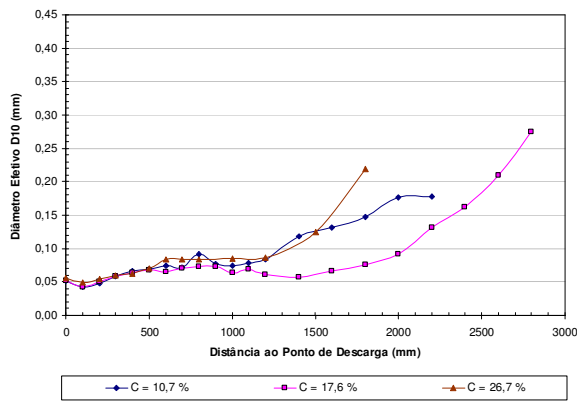
Figura 4.28 Variação do diâmetro médio  $D_{50}$  para as diferentes faixas de concentração e vazão para o rejeito de minério de ferro.



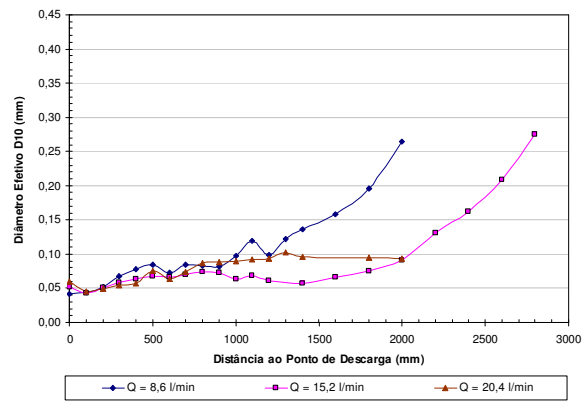
(a) Variação do  $D_{10}$  para várias  $C$  ( $Q \approx 10$  l/min)



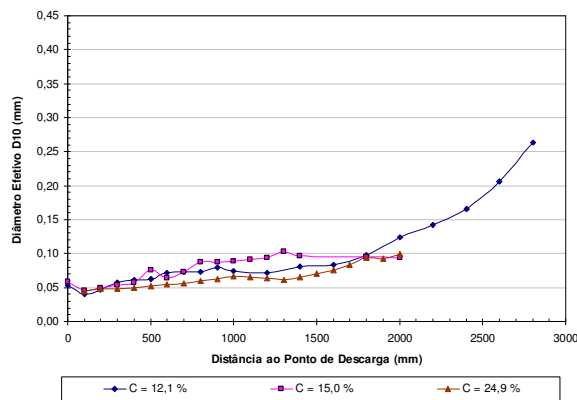
(d) Variação do  $D_{10}$  para várias  $Q$  ( $C \approx 10\%$ )



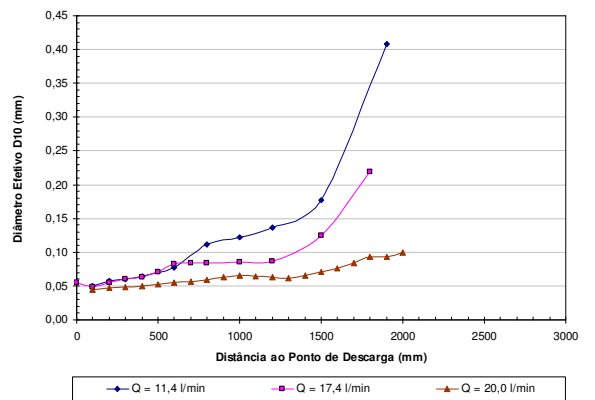
(b) Variação do  $D_{10}$  para várias  $C$  ( $Q \approx 15$  l/min)



(e) Variação do  $D_{10}$  para várias  $Q$  ( $C \approx 15\%$ )



(c) Variação do  $D_{10}$  para várias  $C$  ( $Q \approx 20$  l/min)

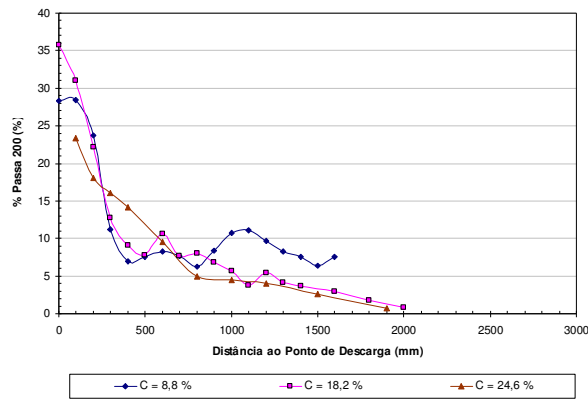


(f) Variação do  $D_{10}$  para várias  $Q$  ( $C \approx 25\%$ )

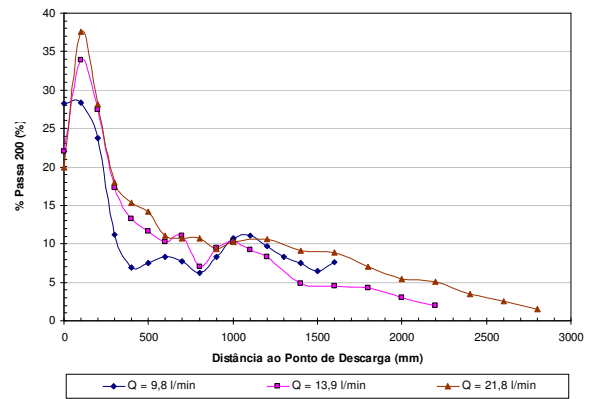
Figura 4.29 Variação do diâmetro efetivo  $D_{10}$  para as diferentes faixas de concentração e vazão para o rejeito de minério de ferro.

Na Figura 4.30, é possível avaliar a variação da porcentagem de material que passa na peneira No. 200. Próximo ao ponto de descarga, tem-se a maior concentração desse material com uma média de 30,1%. A partir deste ponto, esta porcentagem diminui gradualmente até chegar a valores próximos a 5% e inclusive menores. Este fenômeno ocorre devido ao fato de que a grande maioria de partículas com diâmetros menores que 0,074 mm apresentam um conteúdo

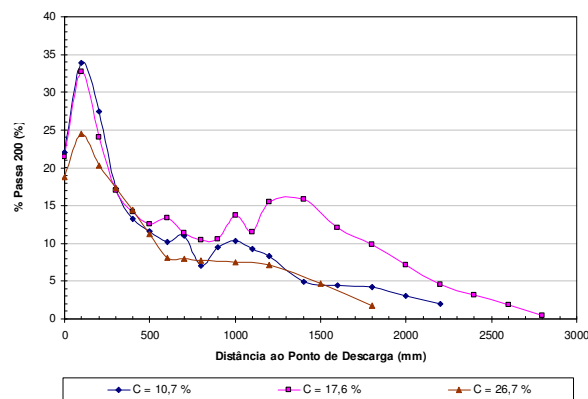
de ferro elevado, apresentando assim um peso específico dos grãos elevado, e sendo mais rapidamente depositados nas praias simuladas. Não foi possível identificar uma influência clara das propriedades que controlam os processos de deposição hidráulica como a concentração e a vazão da lama.



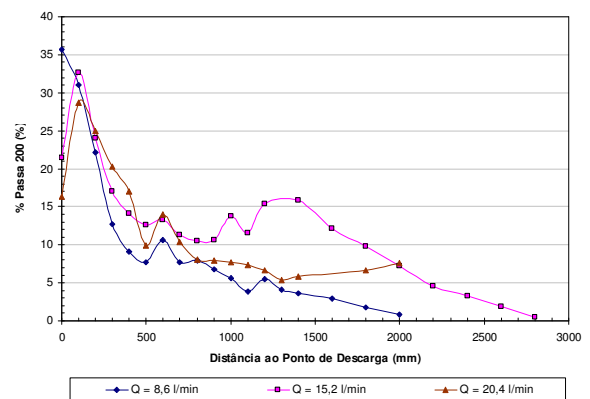
(a) Passa 200 para várias C ( Q ≈ 10 l/min)



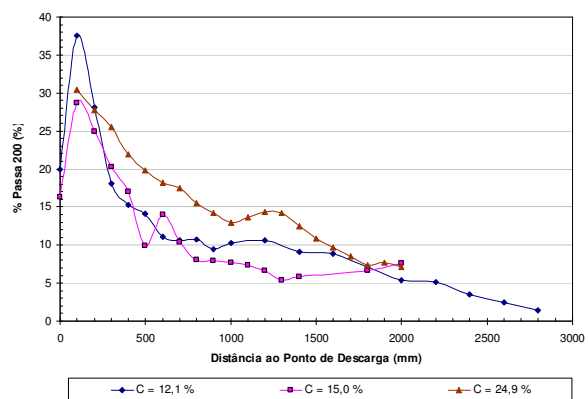
(d) Passa 200 para várias Q ( C ≈ 10%)



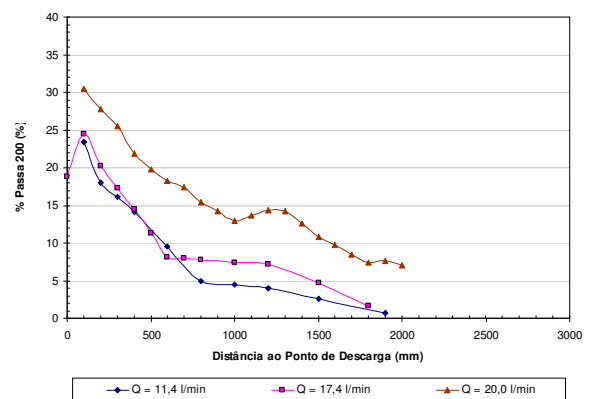
(b) Passa 200 para várias C ( Q ≈ 15 l/min)



(e) Passa 200 para várias Q ( C ≈ 15%)



(c) Passa 200 para várias C ( Q ≈ 20 l/min)



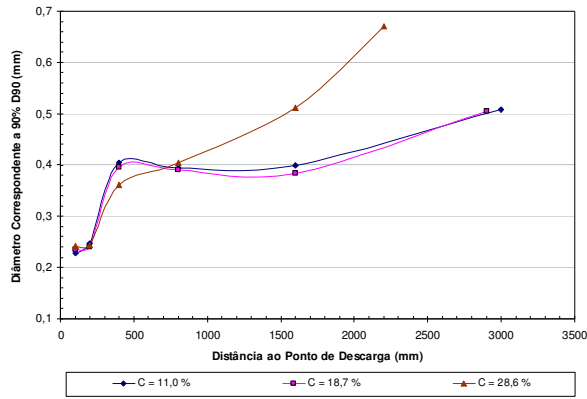
(f) Passa 200 para várias Q ( C ≈ 25%)

Figura 4.30 Variação da porcentagem de material que passa na peneira No. 200 para as diferentes faixas de concentração e de vazão para o rejeito de minério de ferro.

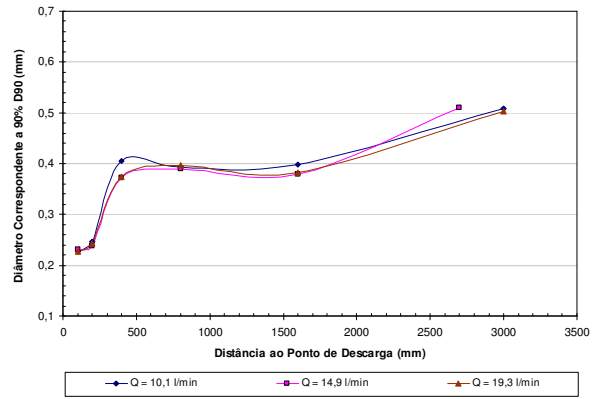
#### 4.3.4.2 Rejeito de minério de ouro

A Figura 4.31 apresenta a variação do diâmetro  $D_{90}$  para as praias em função da vazão e da concentração. É possível observar como o  $D_{90}$  apresenta um valor inicial de aproximadamente 0,23 mm próximo ao ponto de descarga, coincidente com o início das praias, e rapidamente se altera para cerca de 0,40 mm a uma distância de 500 mm do ponto de descarga. Este valor permanece constante até cerca de 1500 mm e posteriormente apresenta um incremento gradual até o final da praia, apresentando valores que variam entre 0,50 e 0,70 mm. Baseado nos resultados apresentados nas figuras anteriores não foi possível perceber diferenças no comportamento do rejeito em função de mudanças na concentração ou na vazão de descarga. Como pode ser observado, a variação no valor de  $D_{90}$  foi semelhante em todos os casos, excetuando o ensaio realizado com maior concentração e menor vazão em que foi gerada uma maior dispersão no valor de  $D_{90}$ .

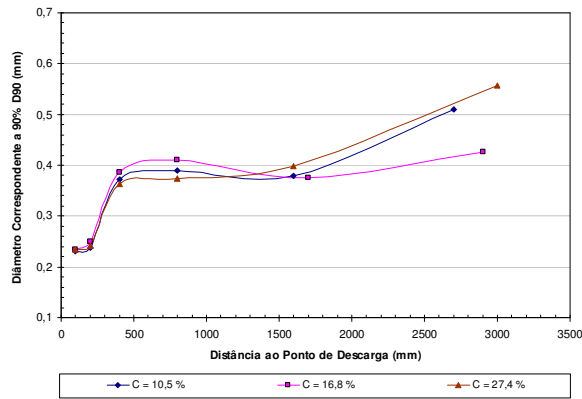
Na Figura 4.32 são apresentados os resultados referentes ao comportamento do diâmetro médio das partículas ( $D_{50}$ ) para os ensaios realizados em função da concentração e da vazão de descarga. O diâmetro médio ( $D_{50}$ ) apresenta um valor inicial, próximo ao ponto de descarga, que varia entre 0,114 e 0,146 mm, com valor médio de 0,130 mm. À medida que se afasta do ponto de descarga, a cerca de 800 mm do ponto de descarga, este parâmetro muda para uma faixa de variação entre 0,168 e 0,208 mm, com uma média de 0,184 mm. A uma distância de 1600 mm do ponto de descarga, o diâmetro médio apresenta uma tendência de redução para valores que variam entre 0,148 e 0,220 mm, com média de 0,174 mm. Na parte final dos depósitos o  $D_{50}$  apresenta uma leve redução, com valores médios de 0,165 mm. Não foi possível verificar uma influência marcante das mudanças na concentração e na vazão na distribuição, ao longo das praias de deposição, do diâmetro médio  $D_{50}$ .



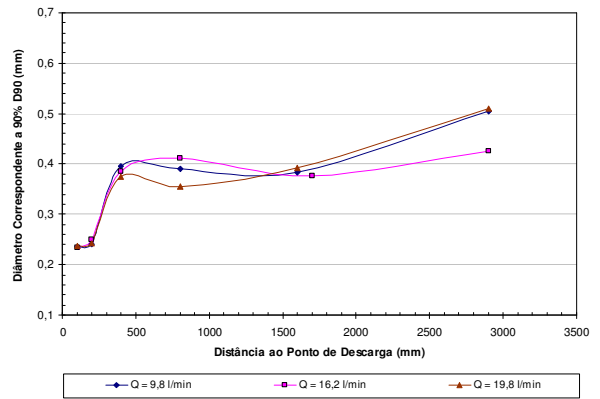
(a) Variação do  $D_{90}$  para várias  $C$  ( $Q \approx 10$  l/min)



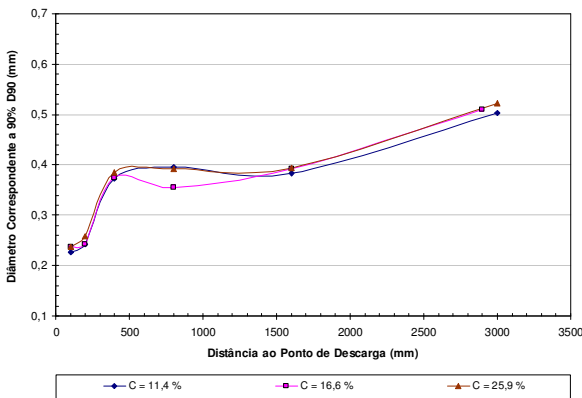
(d) Variação do  $D_{90}$  para várias  $Q$  ( $C \approx 10\%$ )



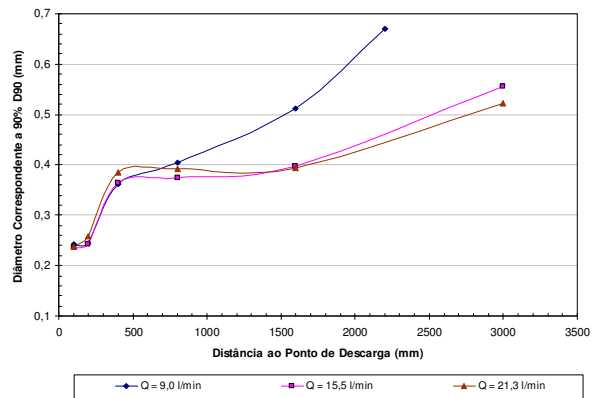
(b) Variação do  $D_{90}$  para várias  $C$  ( $Q \approx 15$  l/min)



(e) Variação do  $D_{90}$  para várias  $Q$  ( $C \approx 15\%$ )

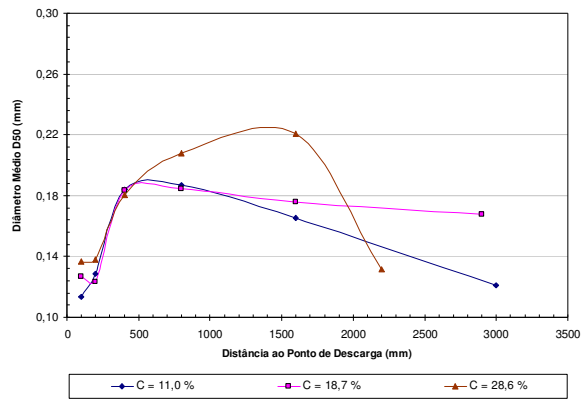


(c) Variação do  $D_{90}$  para várias  $C$  ( $Q \approx 20$  l/min)

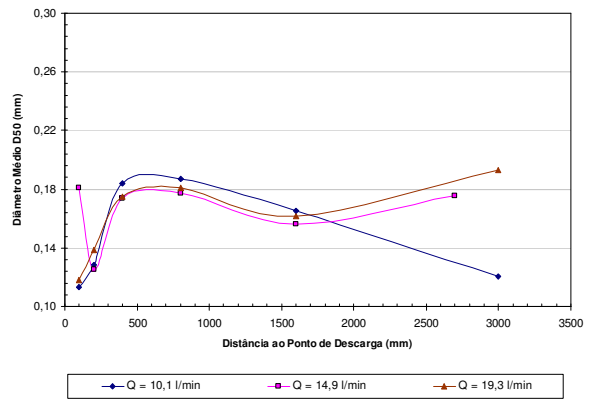


(f) Variação do  $D_{90}$  para várias  $Q$  ( $C \approx 25\%$ )

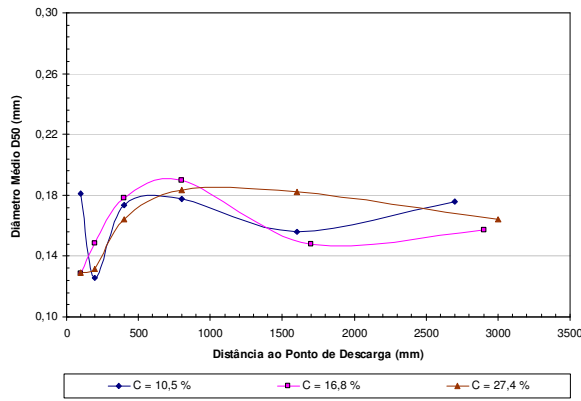
Figura 4.31 Variação do diâmetro correspondente a 90% ( $D_{90}$ ) para as diferentes faixas de concentração e vazão para o rejeito de minério de ouro.



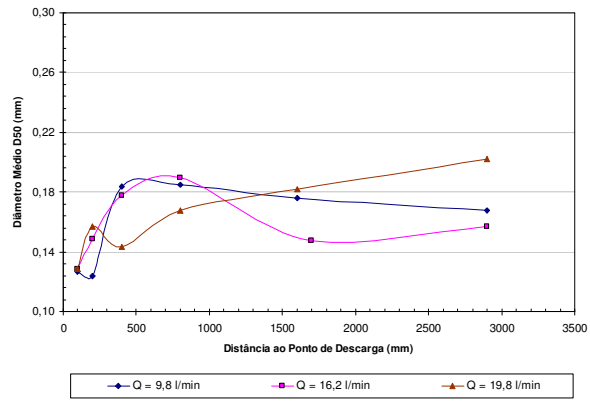
(a) Variação do  $D_{50}$  para várias C ( $Q \approx 10$  l/min)



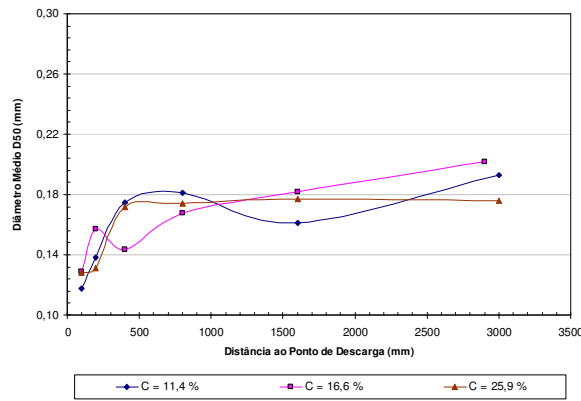
(d) Variação do  $D_{50}$  para várias Q ( $C \approx 10\%$ )



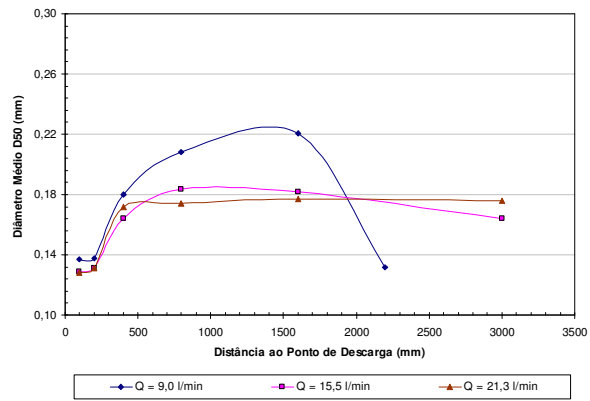
(b) Variação do  $D_{50}$  para várias C ( $Q \approx 15$  l/min)



(e) Variação do  $D_{50}$  para várias Q ( $C \approx 15\%$ )



(c) Variação do  $D_{50}$  para várias C ( $Q \approx 20$  l/min)

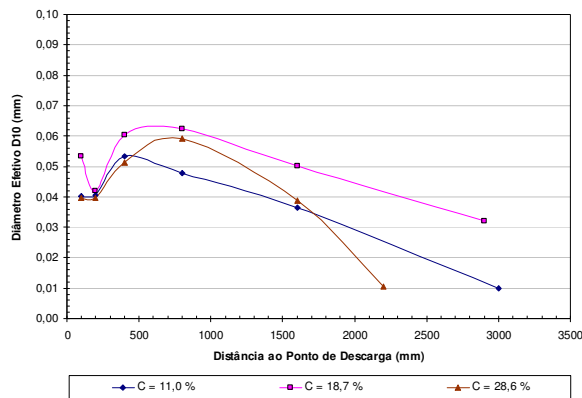


(f) Variação do  $D_{50}$  para várias Q ( $C \approx 25\%$ )

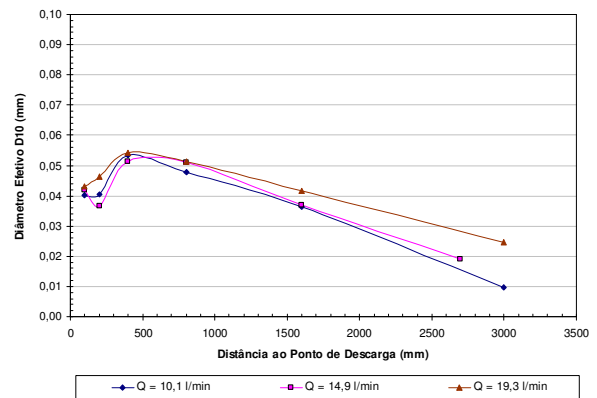
Figura 4.32 Variação do diâmetro médio  $D_{50}$  para as diferentes faixas de concentração e vazão para o rejeito de minério de ouro.

A variação do diâmetro efetivo  $D_{10}$ , ao longo das praias de deposição para as diferentes faixas de concentração e de vazão, é apresentada na Figura 4.33. É possível observar nestas figuras como o diâmetro efetivo apresenta valor inicial médio de 0,046 mm nos primeiros 100 mm das praias, seguido de um acréscimo gradual até atingir um valor máximo de 0,065 mm a cerca de 800 mm do ponto de descarga. Posteriormente, o  $D_{10}$  diminui gradativamente até um

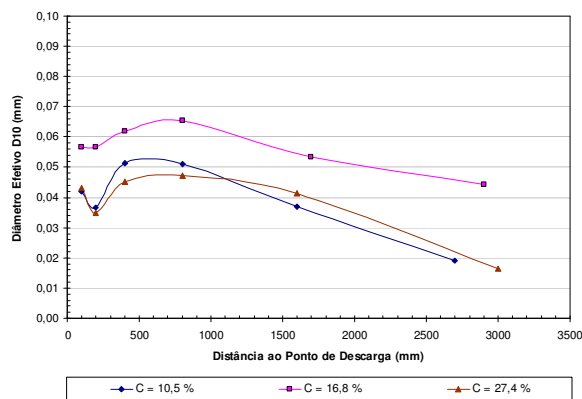
mínimo de 0,010 mm ao final da praia para todas as simulações realizadas no material de rejeito de ouro.



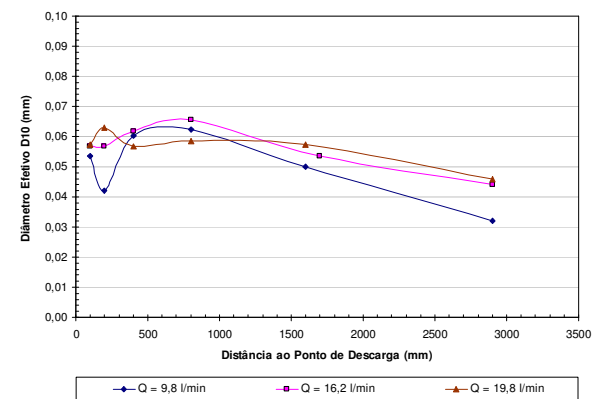
(a) Variação do  $D_{10}$  para várias  $C$  ( $Q \approx 10$  l/min)



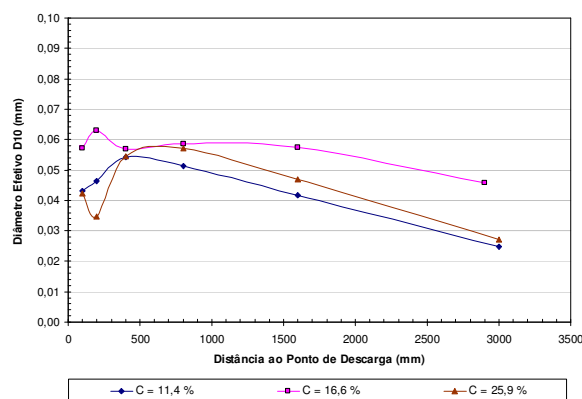
(d) Variação do  $D_{10}$  para várias  $Q$  ( $C \approx 10\%$ )



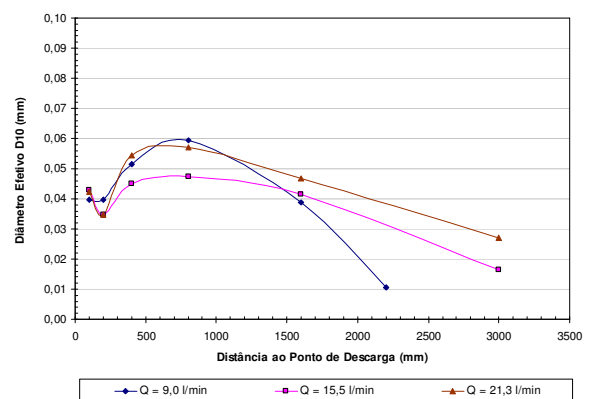
(b) Variação do  $D_{10}$  para várias  $C$  ( $Q \approx 15$  l/min)



(e) Variação do  $D_{10}$  para várias  $Q$  ( $C \approx 15\%$ )



(c) Variação do  $D_{10}$  para várias  $C$  ( $Q \approx 20$  l/min)

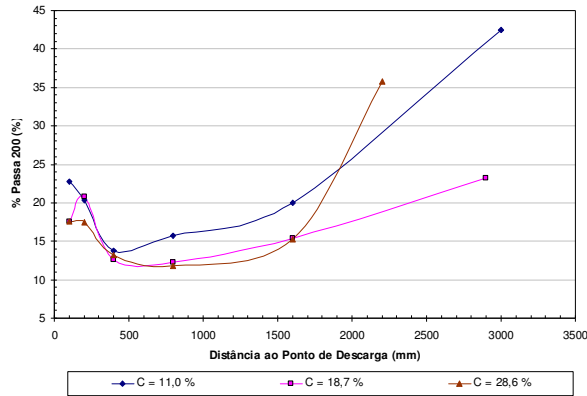


(f) Variação do  $D_{10}$  para várias  $Q$  ( $C \approx 25\%$ )

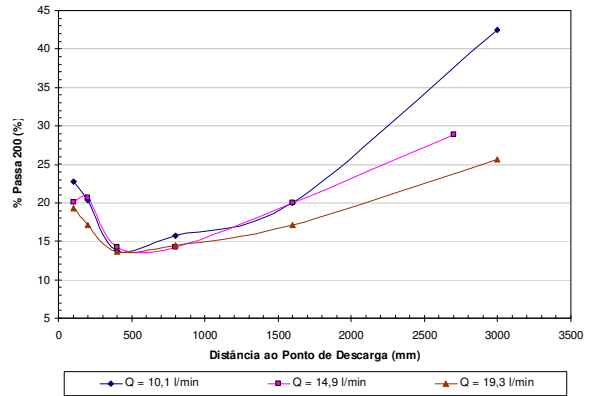
Figura 4.33 Variação do diâmetro efetivo  $D_{10}$  para as diferentes faixas de concentração e vazão para o rejeito de minério de ouro.

A Figura 4.34 apresenta a variação da porcentagem de material que passa na peneira # 200 (0,074 mm) ao longo das praias de deposição para as diferentes faixas de concentração e de vazão de descarga.

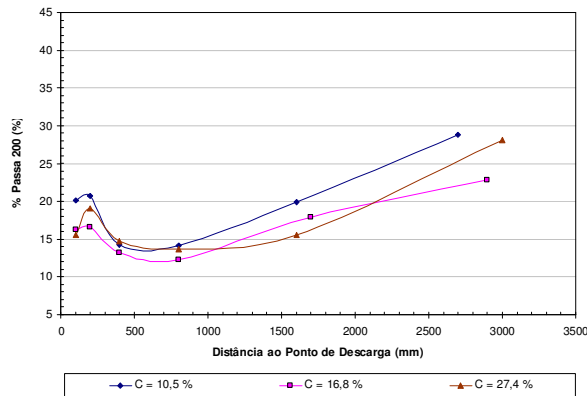




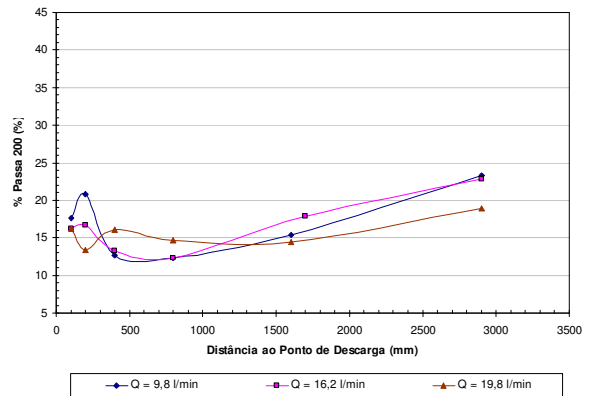
(a) Passa 200 para várias C (  $Q \approx 10$  l/min)



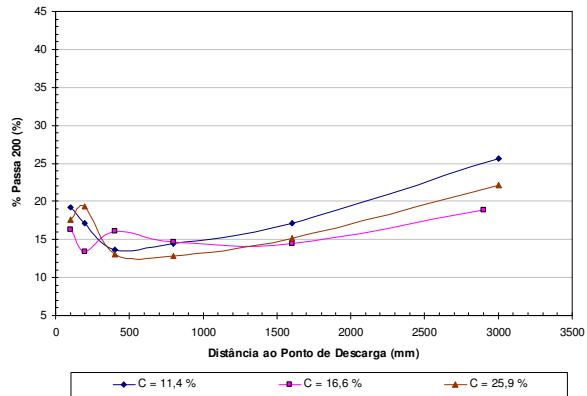
(d) Passa 200 para várias Q (  $C \approx 10\%$ )



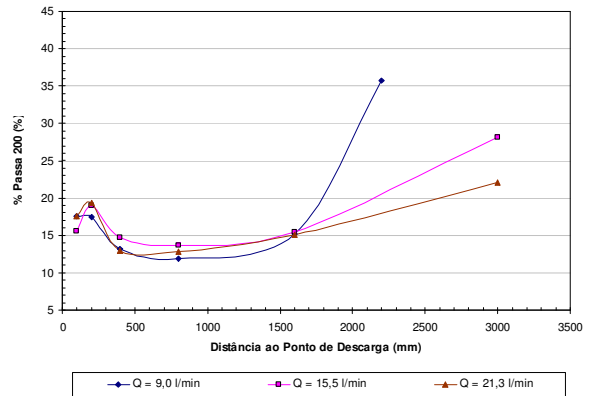
(b) Passa 200 para várias C (  $Q \approx 15$  l/min)



(e) Passa 200 para várias Q (  $C \approx 15\%$ )



(c) Passa 200 para várias C (  $Q \approx 20$  l/min)



(f) Passa 200 para várias Q (  $C \approx 25\%$ )

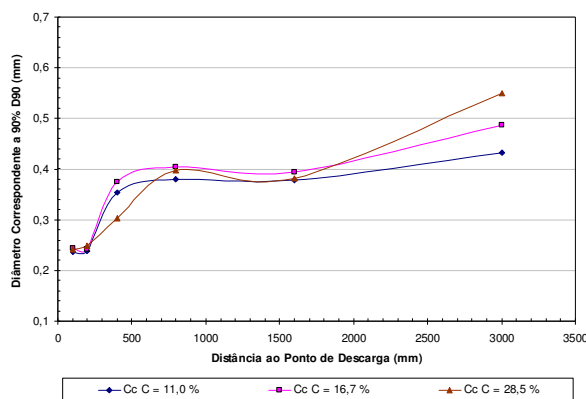
Figura 4.34 Variação da porcentagem de material que passa na peneira No. 200 para as diferentes faixas de concentração e de vazão para o rejeito de minério de ouro.

Observa-se na Figura 4.34 que próximo ao ponto de descarga a porcentagem média de material que passa na peneira # 200 é de 18,1%, com valores que variam entre 15,6 e 22,8%. Na medida em que se afasta do ponto de descarga, a porcentagem de material com diâmetro médio inferior a 0,074 mm tende a evidenciar um leve decréscimo, apresentando valores que variam entre 11,8 e 15,7%, com média de 13,6% até uma distância de 800 mm do ponto de

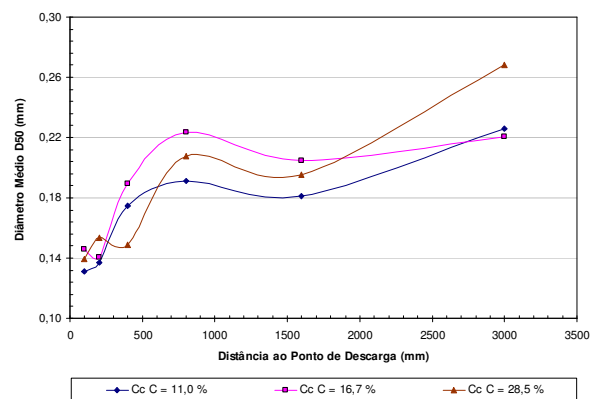
descarga. Em direção ao final da praia a porcentagem de material que passa na peneira # 200 apresenta um aumento gradual, chegando a valores extremos de até 42,5%.

#### 4.3.4.3 Rejeito de minério de ouro ciclonado (*underflow*)

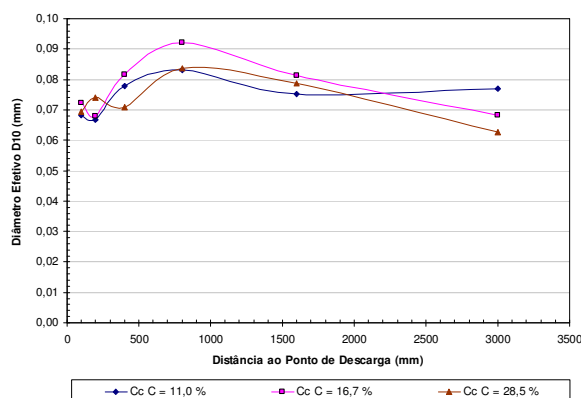
A Figura 4.35 apresenta a variação das propriedades granulométricas das amostras de rejeito de ouro ciclonado obtidas das praias dos ensaios de deposição hidráulica realizados neste material. O  $D_{90}$  passa de um valor médio de 0,240 mm perto do ponto de descarga para 0,394 m a 800 mm do ponto de descarga, permanecendo aproximadamente constante na parte intermediária da praia, e aumentando no trecho final para valores com média de 0,490 mm. Já o Diâmetro Médio  $D_{50}$  inicia com valor médio de 0,139 mm próximo ao ponto de descarga e aumenta para uma média de 0,207 a 800 mm, aumentando gradativamente para 0,238 mm perto do final da praia.



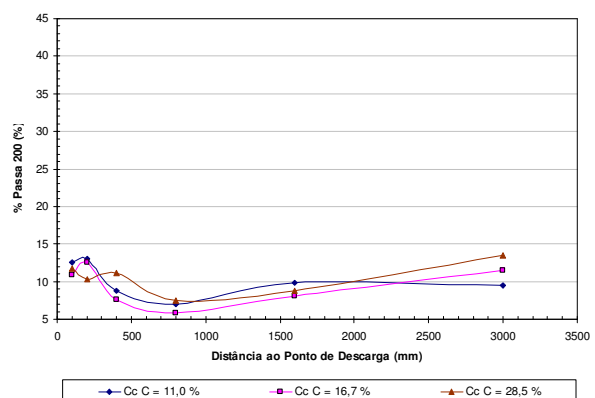
(a) Variação do  $D_{90}$  para várias  $C$  ( $Q \approx 15$  l/min)



(b) Variação do  $D_{50}$  para várias  $C$  ( $Q \approx 15$  l/min)



(c) Variação do  $D_{10}$  para várias  $C$  ( $Q \approx 15$  l/min)



(d) Passa 200 para várias  $C$  ( $Q \approx 15$  l/min)

Figura 4.35 Variação das propriedades granulométricas  $D_{90}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{10}$  e porcentagem de passa No. 200 ao longo das praias de deposição para o rejeito de minério de ouro ciclonado.

Da Figura 4.35 também é possível observar como o Diâmetro Efetivo  $D_{10}$  se comporta ao longo do perfil de deposição. Esta propriedade apresenta um valor médio inicial de 0,070 mm, mudando para 0,086 mm a 800 mm do ponto de descarga e apresentando um valor médio de 0,069 mm ao final da praia. A porcentagem do material que passa na peneira No. 200 apresenta um valor médio inicial de 11,7%, passando para uma média de 6,7% a 800 mm do ponto de descarga e aumentando muito mais lentamente até chegar a um valor médio de 11,5% a uns 3000 mm do ponto de descarga. A porcentagem de material que passa na peneira 200 perto do final da praia é inclusive menor que a encontrada próximo ao ponto de descarga. No caso de rejeito de ouro não ciclonado este fenômeno não ocorre.

Na Figura 4.35d encontram-se os resultados de porcentagem de material que passa na peneira de n. 200 referentes aos ensaios realizados no rejeito ciclonado. Observa-se que este material apresenta os menores valores de porcentagem de material que passa na peneira de n. 200, em comparação com o rejeito de ouro não ciclonado, com valores que variam entre 5,8 e 13,5%. Quando observada a Figura 4.34, que apresenta a variação da porcentagem de material que passa na peneira de n. 200 para várias vazões e concentrações estudadas no rejeito de ouro não ciclonado, fica evidente a diferenciação do comportamento desta propriedade entre o rejeito ciclonado e o não ciclonado. Similar ao caso do diâmetro efetivo ( $D_{10}$ ), esta diferenciação se deve à natureza do processo de ciclonagem realizado no rejeito de ouro, eliminando grande parte da fração fina.

#### 4.3.4.4 Comparação dos resultados entre os diferentes materiais

Não foi possível perceber diferenças no comportamento do rejeito sem ciclonagem e o rejeito ciclonado para o diâmetro  $D_{90}$ . Como pode ser observado, a variação no valor de  $D_{90}$  foi semelhante para os dois materiais, excetuando o ensaio realizado com maior concentração e menor vazão em que foi gerada uma maior dispersão no valor de  $D_{90}$ . Em vista das pequenas variações do  $D_{50}$  para as amostras de rejeito ciclonado e não ciclonado, não foi possível observar uma influência da natureza do material no comportamento desta propriedade.

No caso específico do diâmetro efetivo ( $D_{10}$ ) foi possível observar a influência da natureza do material no comportamento desta propriedade. As praias obtidas a partir do rejeito ciclonado

tenderam a apresentar um diâmetro efetivo em média maior que o obtido para os depósitos gerados com o rejeito não ciclonado. Este fenômeno é explicado pela natureza do processo de ciclonagem, que retira do material ciclonado uma parcela importante da fração fina. Este fato evidencia a eficiência do processo de ciclonagem realizado que tende a contribuir para a diminuição da porcentagem de finos no rejeito, melhorando suas propriedades geotécnicas.

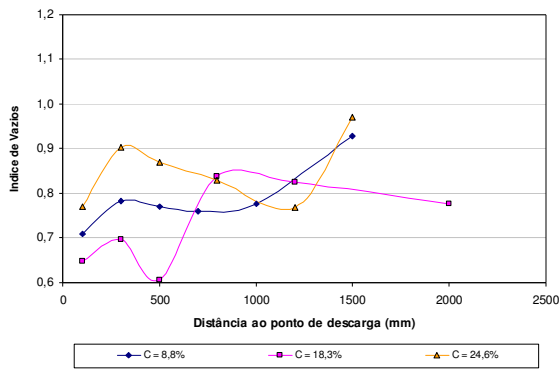
O comportamento do diâmetro médio  $D_{50}$  e do diâmetro efetivo  $D_{10}$  é uma manifestação clara do processo de segregação hidráulica. Inicialmente, partículas com peso específico maior são depositadas (Figuras 4.21 a 4.26), estas partículas apresentam diâmetros menores (Figuras 4.27 a 4.35). Posteriormente, são depositadas as partículas com maior volume, de diâmetros maiores, e, finalmente as partículas mais finas.

#### 4.3.5 Índice de vazios nas praias de deposição

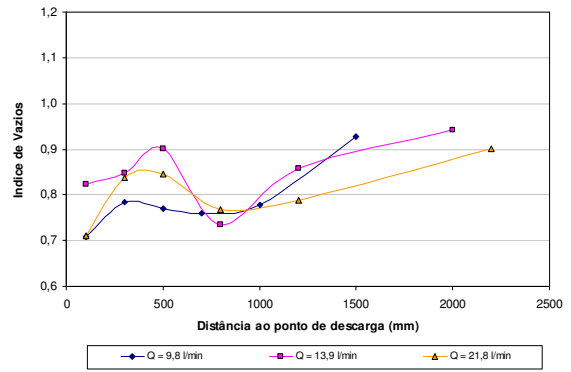
O Índice de Vazios é uma propriedade geotécnica importante que tem um peso marcante no peso específico seco do material assim como na permeabilidade do meio, resistência e deformabilidade. Entender como esta propriedade se distribui no espaço é fundamental para a adequada interpretação de resultados de ensaios e para a modelagem das condições do meio. A seguir são apresentados os valores de Índice de Vazios estimados para as praias de deposição obtidas nos três materiais estudados.

##### 4.3.5.1 Rejeito de minério de ferro

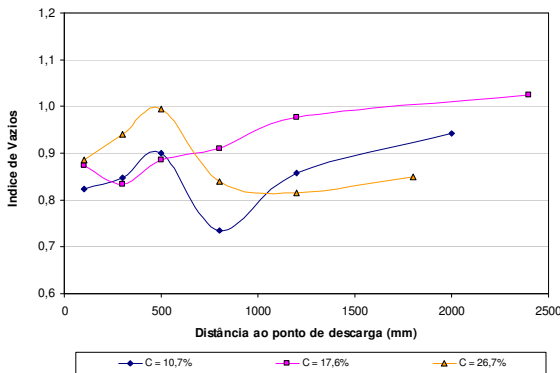
A Figura 4.36 apresenta a variação ao longo das praias de deposição do índice de vazios obtido para o rejeito de minério de ferro. Nas Figuras 4.36c e 4.36f é possível observar como o índice de vazios aumenta nos primeiros 600 mm das praias, passando de valores médios de 0,788 a 100 mm do ponto de descarga, para valores da ordem de 0,864 a 500 mm, com um valor extremo máximo de 1,024. Posteriormente se apresenta uma redução do índice de vazios para um valor médio de 0,825 a 1100 mm do ponto de descarga e no final das praias uma grande dispersão de valores com média de 0,923. Este comportamento é similar ao apresentado pelo diâmetro  $D_{90}$  e pelo diâmetro médio  $D_{50}$ , que apresentam um leve aumento no primeiro trecho das praias, seguido de uma estabilização e, em alguns casos, uma leve redução e no final das praias um aumento gradual.



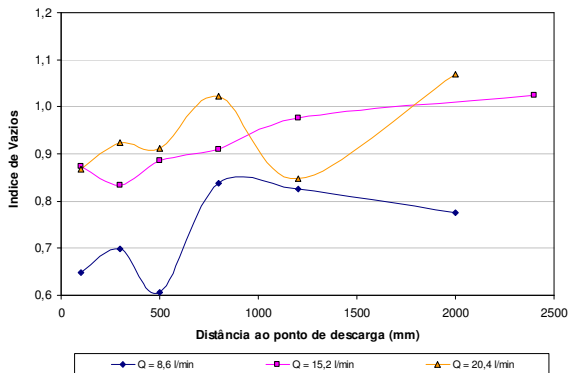
(a) Variação do e para várias C ( $Q \approx 10$  l/min)



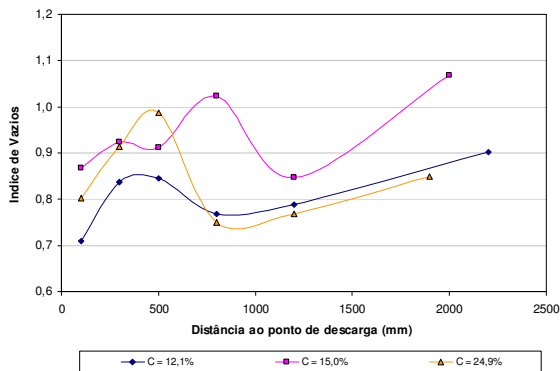
(d) Variação do e para várias Q ( $C \approx 10\%$ )



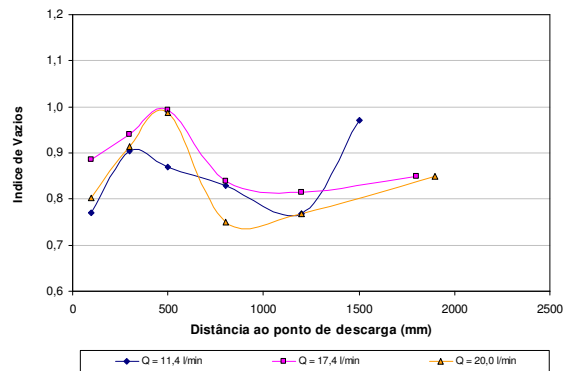
(b) Variação do e para várias C ( $Q \approx 15$  l/min)



(e) Variação do e para várias Q ( $C \approx 15\%$ )



(c) Variação do e para várias C ( $Q \approx 20$  l/min)



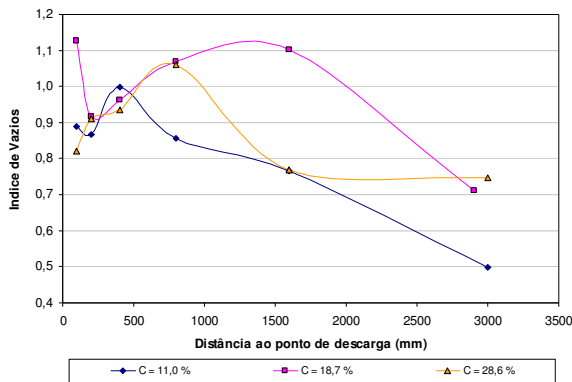
(f) Variação do e para várias Q ( $C \approx 25\%$ )

Figura 4.36 Variação do índice de vazios ao longo da praia para as diferentes faixas de concentração e vazão para o rejeito de minério de ferro.

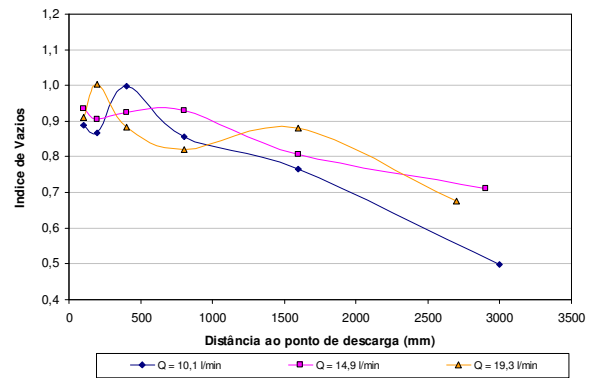
#### 4.3.5.2 Rejeito de minério de ouro

A Figura 4.37 apresenta a variação do índice de vazios para as praias obtidas com o rejeito de minério de ouro. Em geral é possível observar um leve aumento do índice de vazios passando de um valor médio de 0,888 a 200 mm do ponto de descarga para 0,931 a 800 mm, para

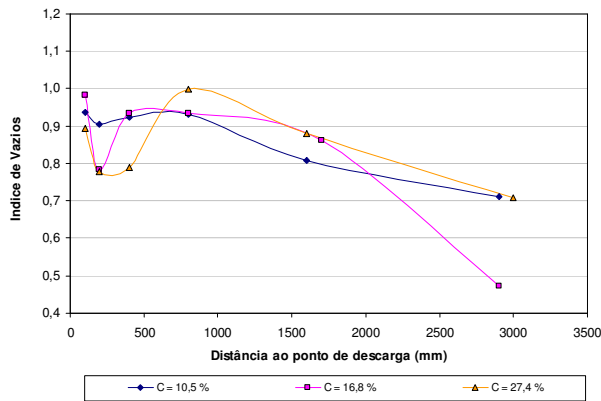
posteriormente apresentar uma redução gradual chegando a um índice de vazios de 0,658 a 3000 mm do ponto de descarga.



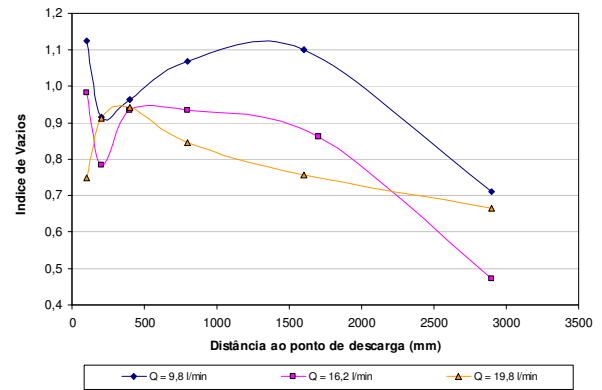
(a) Variação do e para várias C ( $Q \approx 10$  l/min)



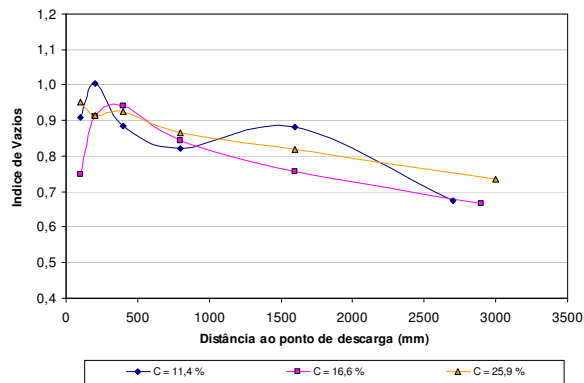
(d) Variação do e para várias Q ( $C \approx 10\%$ )



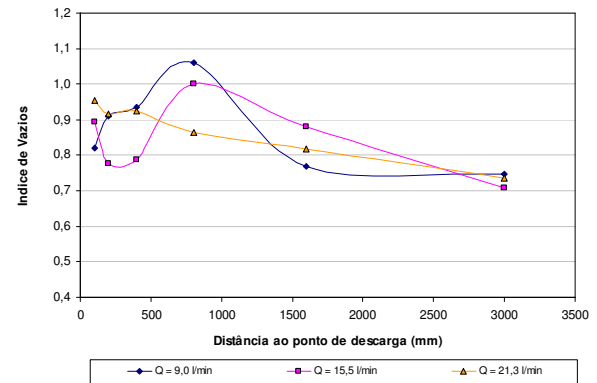
(b) Variação do e para várias C ( $Q \approx 15$  l/min)



(e) Variação do e para várias Q ( $C \approx 15\%$ )



(c) Variação do e para várias C ( $Q \approx 20$  l/min)



(f) Variação do e para várias Q ( $C \approx 25\%$ )

Figura 4.37 Variação do índice de vazios ao longo da praia para as diferentes faixas de concentração e vazão para o rejeito de minério de ouro.

#### 4.3.5.3 Rejeito de minério de ouro ciclonado (*underflow*)

A Figura 4.38 apresenta a variação do índice de vazios para os ensaios realizados no rejeito de minério de ouro ciclonado. Observa-se o leve aumento no primeiro trecho das praias, chegando a um valor médio do índice de vazios de 1,045 a 400 mm do ponto de descarga, e a posterior redução gradual até um valor médio do índice de vazios de 0,763 a 3000 mm do ponto de descarga.

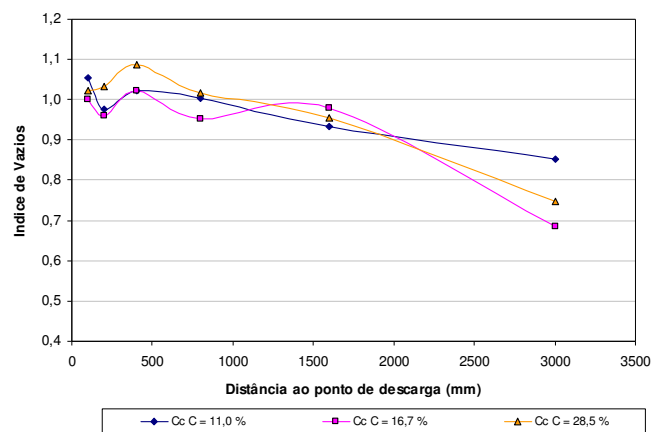


Figura 4.38 Variação do índice de vazios ao longo da praia em função da concentração para o rejeito de minério de ouro ciclonado.

#### 4.3.5.4 Comparação dos resultados entre os diferentes materiais

A Figura 4.39 apresenta a variação do Índice de Vazios Médio ( $e_{med}$ ) para os três materiais estudados. Da figura é possível observar como o rejeito de minério de ouro ciclonado apresenta valores em média 12% maiores aos apresentados pelo rejeito de ouro não ciclonado. Este fenômeno se deve ao fato de que o processo de ciclonagem tem como objetivo retirar uma fração das partículas finas, obtendo assim, após a deposição, uma estrutura mais porosa e com índice de vazios maior.

Na maioria do comprimento da praia os Índices de Vazios do rejeito de minério de ferro são menores aos apresentados pelos rejeitos de minério de ouro, mais no final o índice de vazios aumenta sendo até superior ao apresentado pelo rejeito de minério de ouro ciclonado. Isto se deve a que, na primeira parte da praia, as partículas com um maior teor de ferro são depositadas. Estas partículas em geral apresentam um diâmetro menor (Hernandez, 2002)

obtendo, assim, estruturas mais compactas. No final das praias, a carência de materiais de granulometria mais fina tem como consequência a formação de estruturas mais porosas.

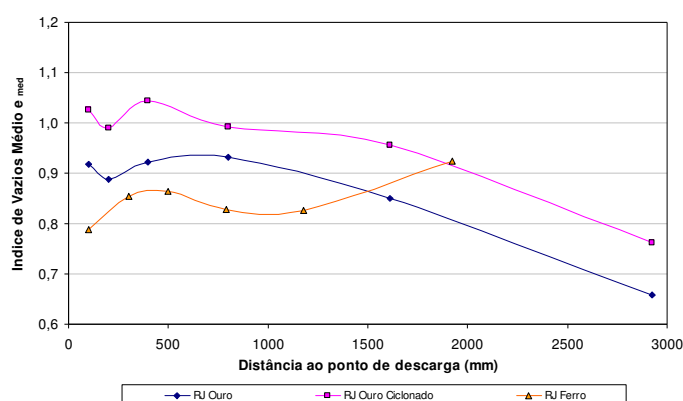


Figura 4.39 Variação do índice de vazios médio  $e_{med}$  ao longo da praia para os três materiais estudados.

#### 4.3.6 Permeabilidade

A permeabilidade é uma das variáveis que condiciona o comportamento hidráulico dos depósitos. Seu conhecimento é de fundamental importância para o entendimento de seu comportamento, tanto em termos de fluxo como de resistência à liquefação estática, adensamento e o próprio processo de deposição. No desenvolvimento desta pesquisa foi desenvolvida uma metodologia para a estimativa da permeabilidade nos depósitos obtidos no ESDH, como apresentado no Capítulo 3.

As medidas tanto *in-situ*, quanto no ESDH, não têm uma elevada precisão devido à alta variabilidade das condições dos depósitos hidráulicos. No entanto, na presente pesquisa foi utilizada uma das relações apresentadas por Hvorslev (1949), citado por Lambe & Whitman (1994), que podem ser empregadas para a estimativa da permeabilidade com a utilização de um equipamento simples, como o cilindro de parede delgada cravado no solo e a medição da variação de carga  $\Delta H$  num intervalo de tempo  $\Delta t$ . A relação de Hvorslev utilizada nesta pesquisa e que foi elaborada para um solo dentro do cilindro em um terreno uniforme em condições de carga variável é dada por:

$$k_v = \frac{\pi \times \frac{D}{m} + L}{t_2 - t_1} \ln\left(\frac{H_1}{H_2}\right) \quad (4.18)$$



sendo:

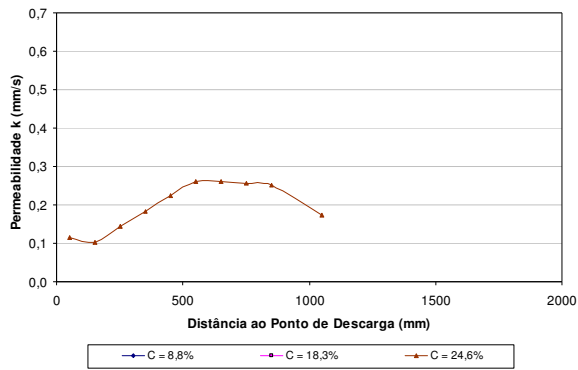
- $k_v$ : Permeabilidade vertical na câmara (mm/s);
- $D$ : Diâmetro da amostra na câmara (mm);
- $L$ : Comprimento da amostra (mm);
- $H_{1,2}$ : Carga piezométrica no tempo  $t_{1,2}$  (mm);
- $t_{1,2}$ : Tempo (s);
- $m$ : Razão de transformação  $m = \sqrt{k_h/k_v} = 1$ .

#### 4.3.6.1 Rejeito de minério de ferro

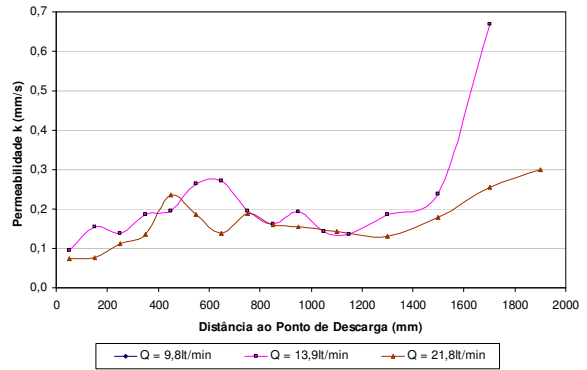
A Figura 4.40 apresenta os resultados da determinação da permeabilidade em função da distância ao ponto de descarga, com a utilização da relação apresentada por Hvorslev, nas praias de deposição obtidas com o rejeito de minério de ferro. Observa-se como a permeabilidade aumenta na medida em que se afasta do ponto de descarga e atinge o seu valor máximo próximo de 500 mm. Depois, apresenta uma redução sem chegar aos valores apresentados perto do ponto de descarga. O posterior aumento da permeabilidade ao chegar perto do final da praia deve-se, possivelmente, ao aparecimento da influência do estrato de rejeito subjacente ao depósito estudado.

Esta observação confirma, em parte, as apreciações feitas no caso da massa específica seca, em que as partículas menores, mas com massa específica dos grãos maior, se depositam perto do ponto de descarga. Posteriormente, apresenta-se uma transição para partícula com volume maior e, finalmente, as partículas com uma massa específica dos grãos menor e um volume igualmente menor são as últimas a se depositarem.

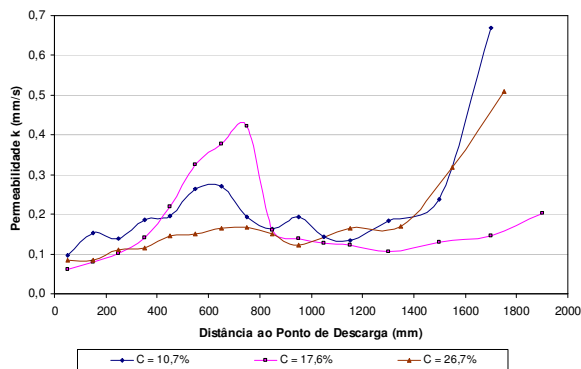
É de ressaltar que os valores de permeabilidade aqui obtidos não são valores absolutos e sim uma tentativa de obter uma estimativa representativa dos possíveis valores reais que se podem apresentar, tanto no ESDH, como nas condições de campo.



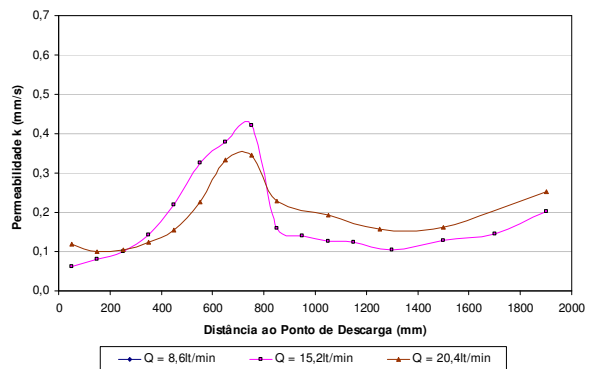
(a) Variação da k para várias C ( $Q \approx 10$  l/min)



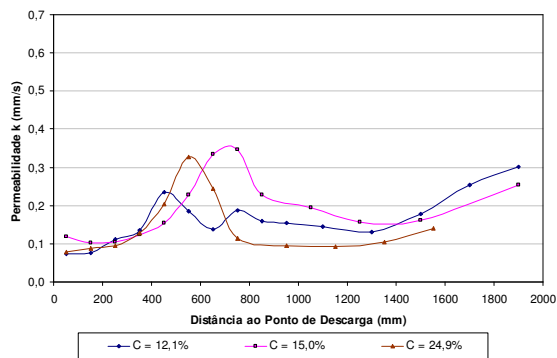
(d) Variação da k para várias Q ( $C \approx 10\%$ )



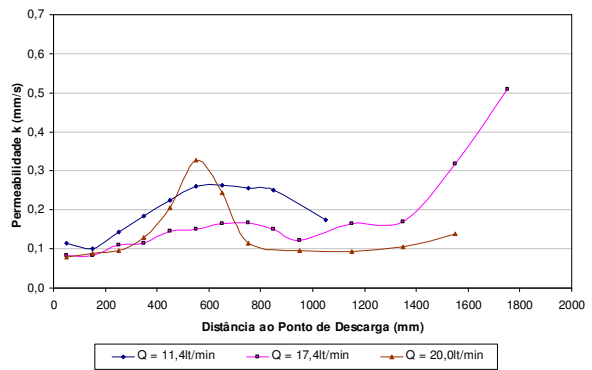
(b) Variação da k para várias C ( $Q \approx 15$  l/min)



(e) Variação da k para várias Q ( $C \approx 15\%$ )



(c) Variação da k para várias C ( $Q \approx 20$  l/min)



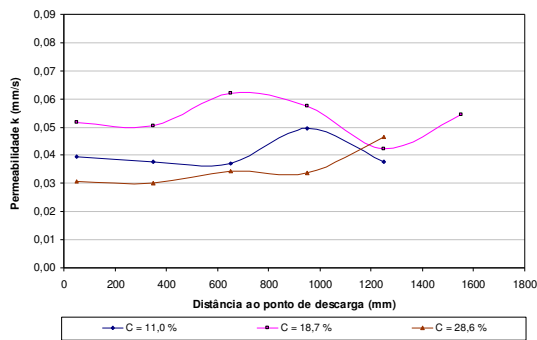
(f) Variação da k para várias Q ( $C \approx 25\%$ )

Figura 4.40 Variação da permeabilidade ao longo da praia para as diferentes faixas de concentração e vazão para o rejeito de minério de ferro.

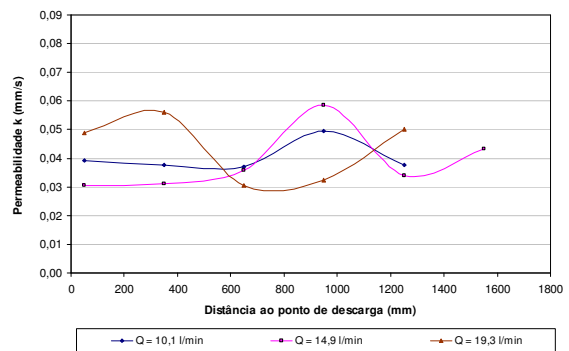
#### 4.3.6.2 Rejeito de minério de ouro

Na Figura 4.41 são apresentados os resultados da determinação da permeabilidade em função da distância ao ponto de descarga com a utilização da relação apresentada por Hvorslev para o material de minério de ouro. Pode-se observar na Figura 4.41 como a permeabilidade apresenta um leve aumento na medida em que se afasta do ponto de descarga, e chega a seu

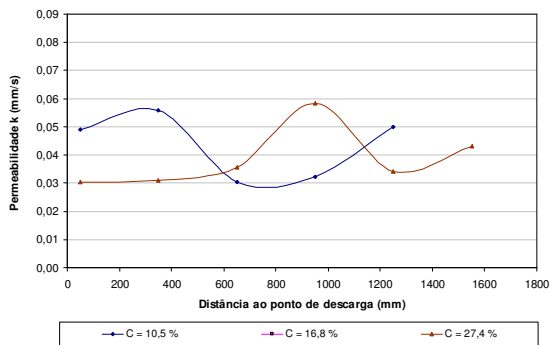
valor máximo próximo à distância de 1000 mm do ponto de descarga. Depois de atingido este valor máximo, que coincide em geral com a concentração de partículas mais grossas, a permeabilidade apresenta uma redução, tendendo em alguns casos a estabilizar. No entanto, em geral, o comportamento da permeabilidade não apresenta uma tendência clara com relação as variáveis que controlam o processo de deposição hidráulica ou ao comprimento da praia, excetuando uma leve relação com a granulometria do material que será apresentada posteriormente.



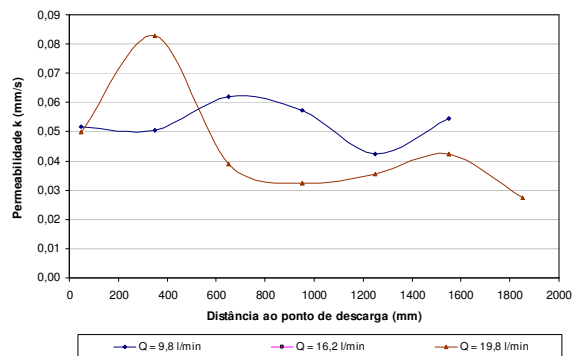
(a) Variação da  $k$  para várias  $C$  ( $Q \approx 10$  l/min)



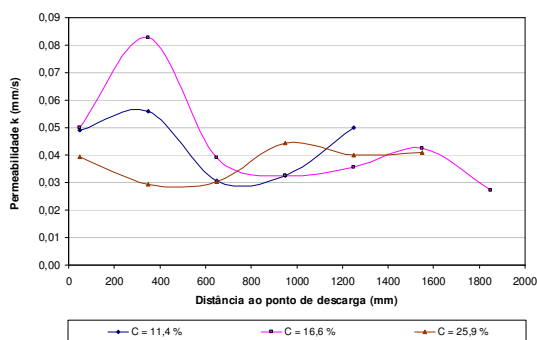
(d) Variação da  $k$  para várias  $Q$  ( $C \approx 10\%$ )



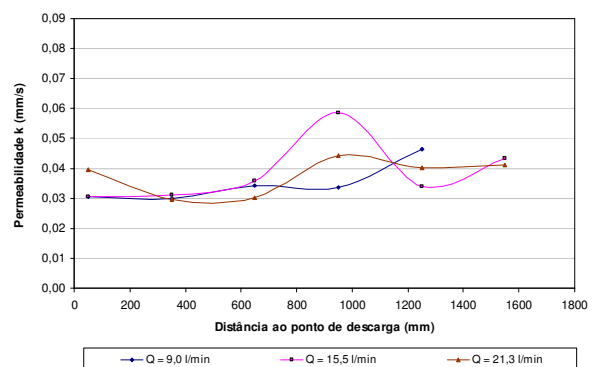
(b) Variação da  $k$  para várias  $C$  ( $Q \approx 15$  l/min)



(e) Variação da  $k$  para várias  $Q$  ( $C \approx 15\%$ )



(c) Variação da  $k$  para várias  $C$  ( $Q \approx 20$  l/min)



(f) Variação da  $k$  para várias  $Q$  ( $C \approx 25\%$ )

Figura 4.41 Variação da permeabilidade ao longo da praia para as diferentes faixas de concentração e vazão para o rejeito de minério de ouro.

#### 4.3.6.3 Rejeito de minério de ouro ciclonado (*underflow*)

A Figura 4.42 apresenta a relação de variação da permeabilidade ao longo das praias de deposição para os ensaios realizados no rejeito de ouro ciclonado. Neste caso o comportamento, anteriormente descrito, de aumento da permeabilidade e posterior redução fica mais claramente evidenciado. O rejeito de ouro ciclonado passa de permeabilidades da ordem de 0,07 mm/s para permeabilidades da ordem de 0,14 mm/s a uns 800 mm do ponto de descarga. Posteriormente se apresenta uma redução gradual até finalmente se estabilizar em valores de permeabilidade na faixa de 0,11 mm/s.

Já os valores de permeabilidade do rejeito de minério de ferro são superiores aos apresentados pelos rejeitos de minério de ouro. Este fenômeno se deve basicamente à diferença granulométrica dos dois tipos de rejeito, que é condicionada pela mineralogia e pelos diferentes processos de beneficiamento.

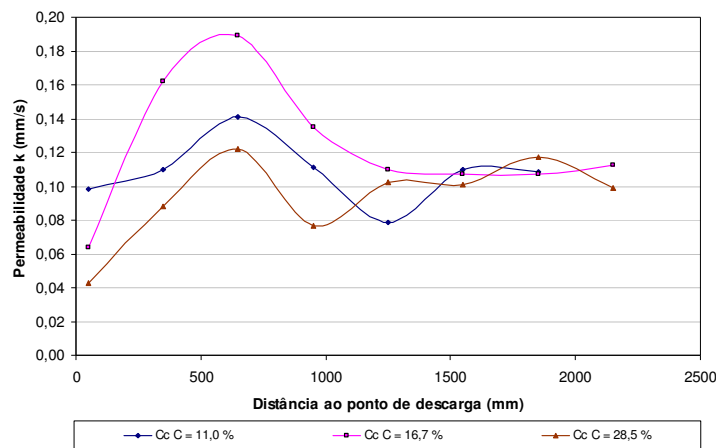


Figura 4.42 Variação da permeabilidade ao longo da praia em função da concentração para o rejeito de minério de ouro ciclonado.

#### 4.3.6.4 Comparação dos resultados entre os diferentes materiais

Ao comparar as Figuras 4.41 e 4.42 fica evidente que os depósitos gerados com o rejeito ciclonado apresentam maiores valores de permeabilidade que o rejeito não ciclonado. Pode-se observar que para o rejeito não ciclonado a permeabilidade varia entre 0,03 mm/s e 0,08 mm/s com um valor médio de 0,04 mm/s para as medições feitas nos primeiros 1250 mm das praias. Já a permeabilidade do rejeito de ouro ciclonado varia entre 0,04 mm/s e 0,19 mm/s, com

média de 0,1 mm/s, para as medições feitas nos primeiros 1250 mm das praias, o que representa uma permeabilidade 148% maior que se comparado com o rejeito de ouro não ciclonado. A baixa permeabilidade do rejeito de ouro em comparação com a do rejeito de ouro ciclonado se deve à maior presença de materiais finos no primeiro material (passa No 200 > 20%). Outra característica que também influencia as variações de permeabilidade é o coeficiente de uniformidade que, para o caso do rejeito de ouro ciclonado, é de 3,03, enquanto que para o rejeito de ouro é de 8,28, o que representa a boa distribuição granulométrica do material, apresentando menores permeabilidades quando hidraulicamente depositado.

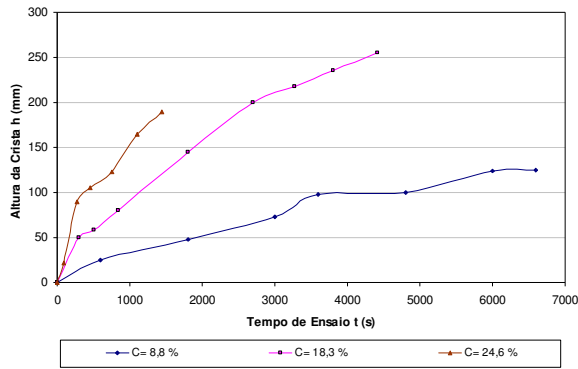
#### 4.3.7 Variação da altura da crista

A velocidade com a qual a altura da crista varia é um parâmetro fundamental na modelagem numérica do problema. Na realização dos ensaios na presente pesquisa, foi medida a variação da altura da crista com o tempo de duração do ensaio, para os diferentes materiais estudados.

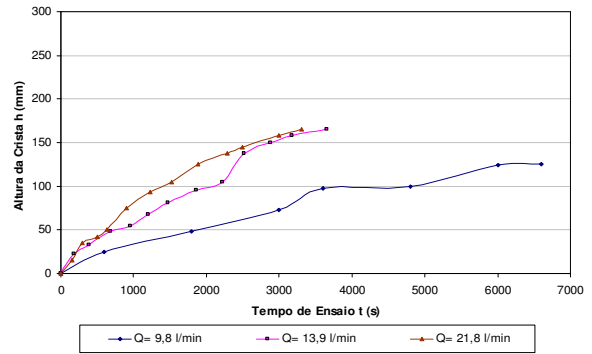
##### 4.3.7.1 Rejeito de minério de ferro

A Figura 4.43 apresentam os resultados obtidos da medição da variação da altura da crista com o tempo de ensaio nos experimentos realizados no material de rejeito de minério de ferro. Nos gráficos, estão apresentados os resultados de variação da altura da crista com o tempo para diferentes concentrações e vazões. Pode-se observar como as variações na concentração têm uma influência maior na taxa de aumento da altura da crista nos primeiros 10 min de ensaio, passando de uma taxa de crescimento de 4,9 mm/min, no ensaio que apresenta uma concentração de 12,1% e uma vazão de 21,8 l/min, para uma taxa de 14,7 mm/min para o ensaio de concentração de 24,9% e vazão de 20,03 l/min. Isto representa um aumento na taxa de crescimento da altura da crista de mais de 198% durante os primeiros 10 min do ensaio.

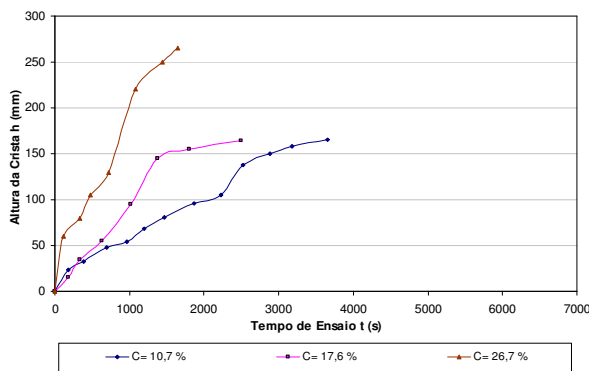
O efeito da mudança na vazão não é tão marcante quando a concentração permanece aproximadamente invariável. Nos ensaios que apresentam uma concentração aproximada de 25% observou-se uma variação da taxa de crescimento da altura da crista de 29%, passando de um valor de 11,4 mm/min, quando o ensaio apresenta uma vazão de 11,4 l/min, para um valor de 14,7 mm/min, quando o ensaio apresenta uma vazão de 20,0 l/min.



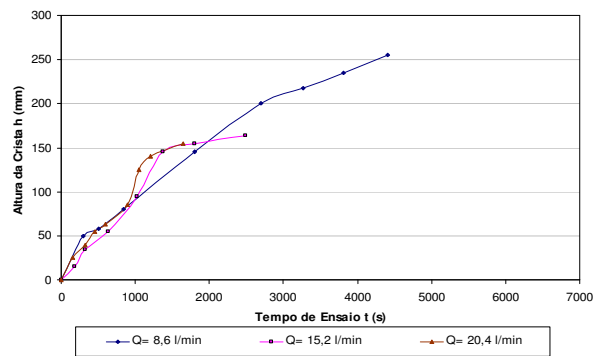
(a) Variação da h para várias C ( $Q \approx 10$  l/min)



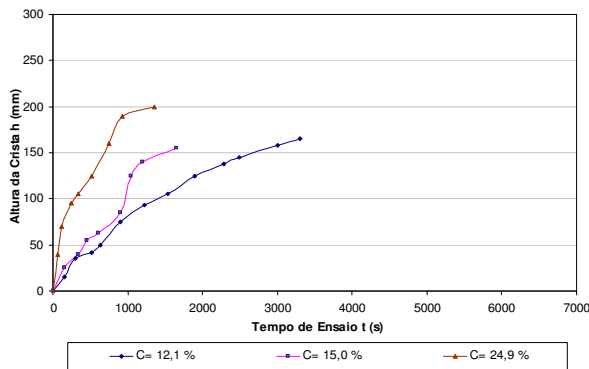
(d) Variação da h para várias Q ( $C \approx 10\%$ )



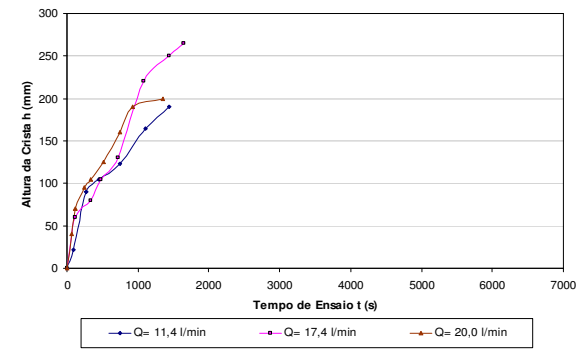
(b) Variação da h para várias C ( $Q \approx 15$  l/min)



(e) Variação da h para várias Q ( $C \approx 15\%$ )



(c) Variação da h para várias C ( $Q \approx 20$  l/min)

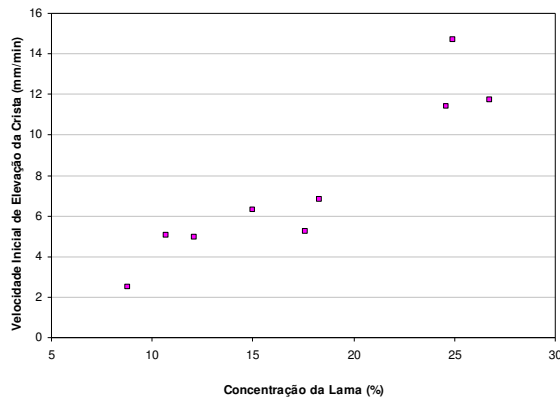


(f) Variação da h para várias Q ( $C \approx 25\%$ )

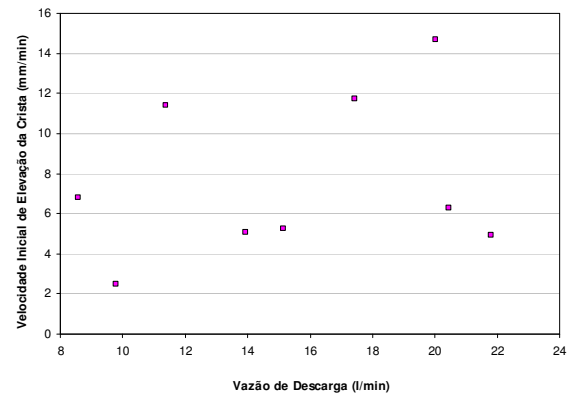
Figura 4.43 Variação da altura da crista (h) com o tempo de ensaio para as diferentes faixas de concentração e vazão para o rejeito de minério de ferro.

Desta forma, pode-se concluir que as mudanças na concentração da lama de rejeito de minério de ferro apresentam um maior impacto na mudança da taxa de variação da altura da crista do que as variações na vazão de descarga. Este comportamento fica ainda mais evidente ao observar a Figura 4.44 onde é representada a velocidade inicial de elevação da crista em

função da concentração e da vazão. Observa-se uma clara relação entre a velocidade de elevação da crista e a concentração. Já com a vazão a relação não é evidente.



(a) Velocidade vs. Concentração

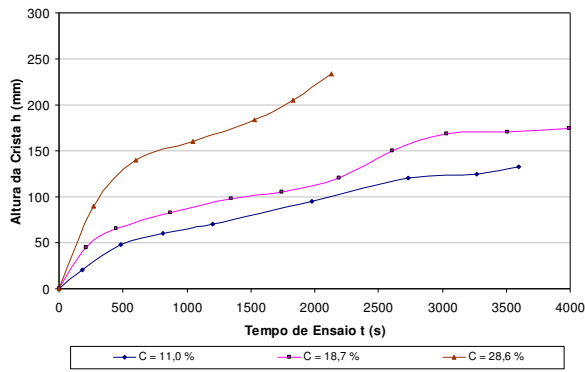


(b) Velocidade vs. Vazão

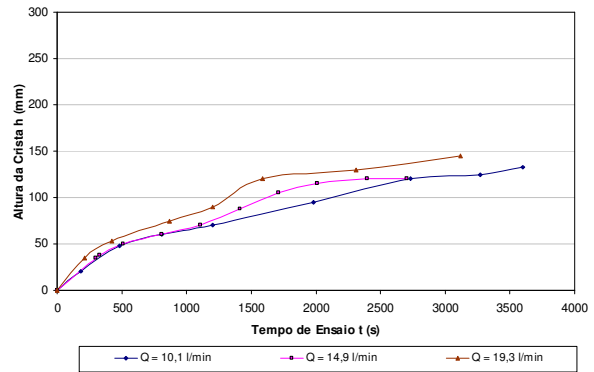
Figura 4.44 Variação da velocidade inicial de elevação da crista em função da concentração e da vazão para o rejeito de minério de ferro: (a) Velocidade vs. concentração; (b) Velocidade vs. vazão.

#### 4.3.7.2 Rejeito de minério de ouro

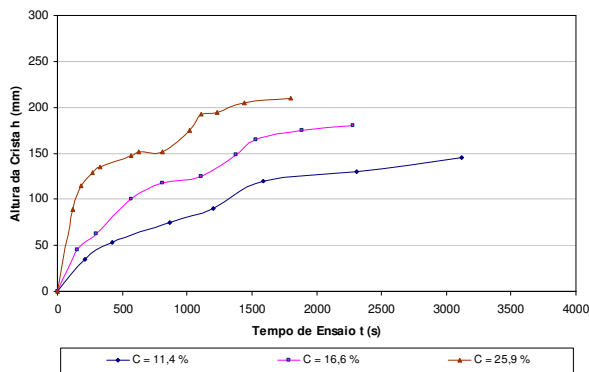
A Figura 4.45 apresenta os resultados obtidos na análise da variação da altura da crista com o tempo de ensaio. A Figura 4.45c apresenta os resultados de variação da altura da crista com o tempo, para diferentes concentrações, com uma vazão aproximada de 20 l/min. Já na Figura 4.45f é possível observar a influência na mudança da vazão sobre a razão de crescimento da altura da crista para uma concentração aproximada de 25%. Destas figuras pode-se observar como as variações na concentração têm uma influência maior na taxa de aumento da altura da crista, passando de uma taxa de crescimento de 7,6 mm/min, para uma concentração de 11,4%, durante os primeiros minutos de ensaio, para uma taxa de 38,3 mm/min, para uma concentração de 25,9%. Isso representa um aumento na taxa de crescimento da altura da crista de mais de 404% durante os primeiros minutos do ensaio.



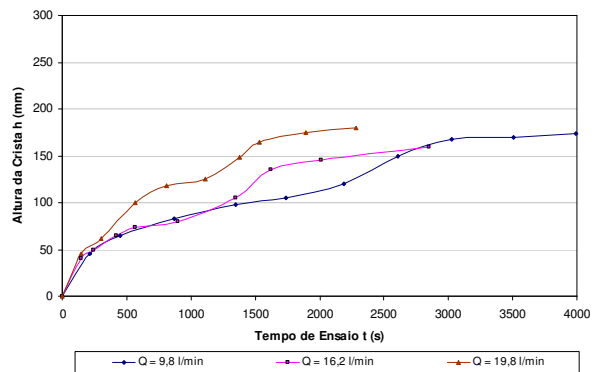
(a) Variação da h para várias C ( $Q \approx 10$  l/min)



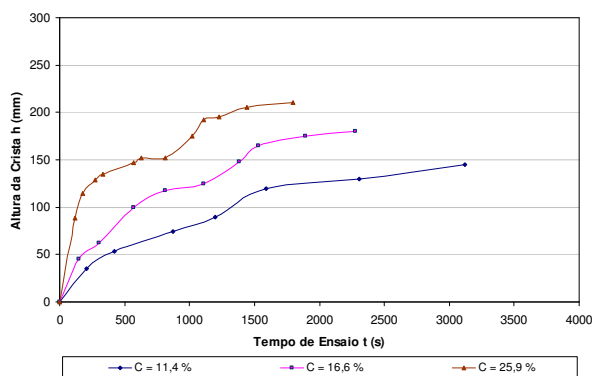
(d) Variação da h para várias Q ( $C \approx 10\%$ )



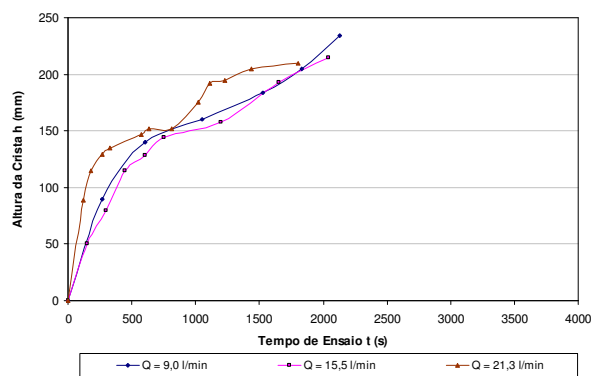
(b) Variação da h para várias C ( $Q \approx 15$  l/min)



(e) Variação da h para várias Q ( $C \approx 15\%$ )



(c) Variação da h para várias C ( $Q \approx 20$  l/min)



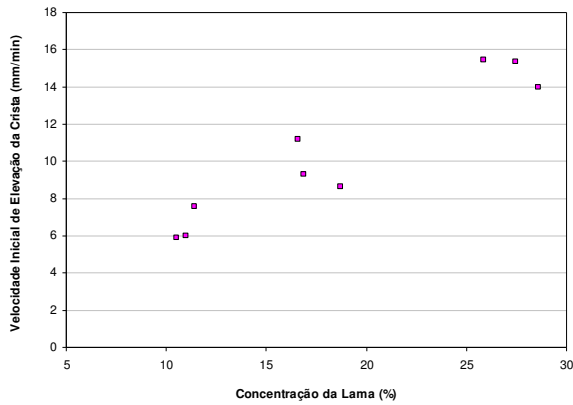
(f) Variação da h para várias Q ( $C \approx 25\%$ )

Figura 4.45 Variação da altura da crista (h) com o tempo de ensaio para as diferentes faixas de concentração e vazão para o rejeito de minério de ouro.

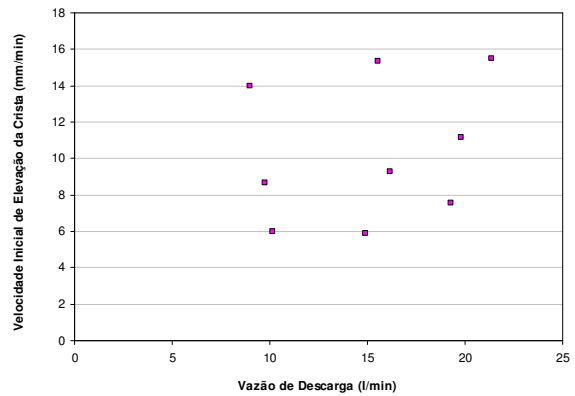
De forma similar ao observado para o material de rejeito de minério de ferro o efeito da mudança na vazão não é tão marcante quanto o da concentração. Entretanto, nos ensaios que apresentam uma concentração aproximada de 25% observou-se uma variação da taxa de crescimento da altura da crista de 10,5%, passando de um valor de 14,0 mm/min, quando o ensaio apresenta uma vazão de 9,0 l/min, para um valor de 15,4 mm/min, quando o ensaio apresenta uma vazão de 21,3 l/min. A Figura 4.46 apresenta os resultados de variação da



velocidade inicial de elevação da crista em função da concentração e da vazão. É possível observar como as mudanças na concentração têm um comportamento marcante na mudança da velocidade de elevação da crista. Este comportamento não é observado no caso de mudanças na vazão.



(a) Velocidade vs. Concentração

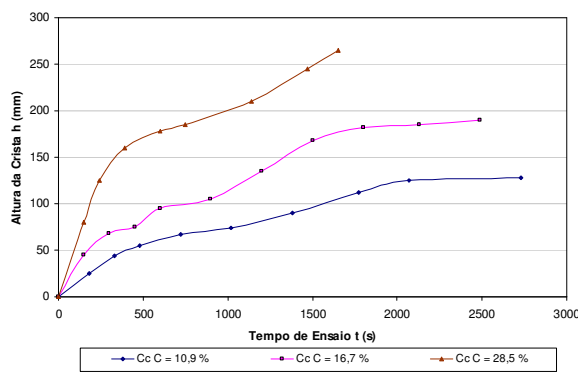


(b) Velocidade vs. Vazão

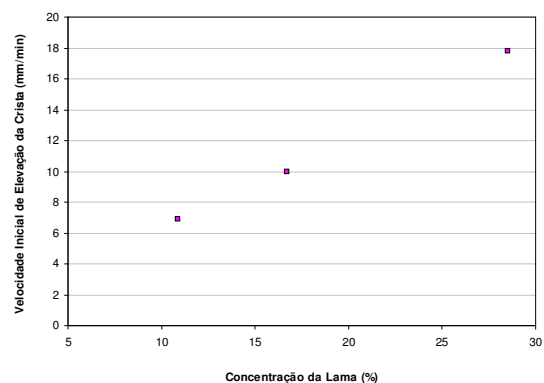
Figura 4.46 Variação da velocidade inicial de elevação da crista em função da concentração e da vazão para o rejeito de minério de ouro: (a) Velocidade vs. concentração; (b) Velocidade vs. vazão.

#### 4.3.7.3 Rejeito de minério de ouro ciclonado (*underflow*)

A Figura 4.47 apresenta a variação da altura da crista com o tempo e a relação entre a velocidade inicial de elevação com a concentração para os ensaios realizados no rejeito de ouro ciclonado. De forma similar às observações realizadas para outros dois materiais é evidente a influência da concentração na variação da altura da crista.



(a) Variação da Altura da Crista



(b) Velocidade Inicial de Elevação

Figura 4.47 Variação da altura da crista com o tempo e da velocidade inicial de elevação para o rejeito de minério de ouro ciclonado.

#### 4.3.7.4 Comparação dos resultados entre os diferentes materiais

A Figura 4.48 apresenta a variação da velocidade inicial de elevação da crista em função da concentração e da vazão para os três materiais estudados. Da Figura 4.48a é possível observar que os valores de velocidade inicial para os rejeitos de minério de ouro são levemente maiores que os apresentados pelo rejeito de minério de ferro. Ainda assim fica evidente a relação entre a velocidade inicial de elevação da crista e a concentração da lama. Para o caso de variação da velocidade inicial de elevação da crista com a vazão de descarga não é possível obter qualquer conclusão. Isto se deve ao fato de que pequenas variações na concentração da lama influenciam o poder de transporte do fluido, alterando as características de deposição. Lamas com maior concentração apresentam maior viscosidade, com um poder de transporte menor.

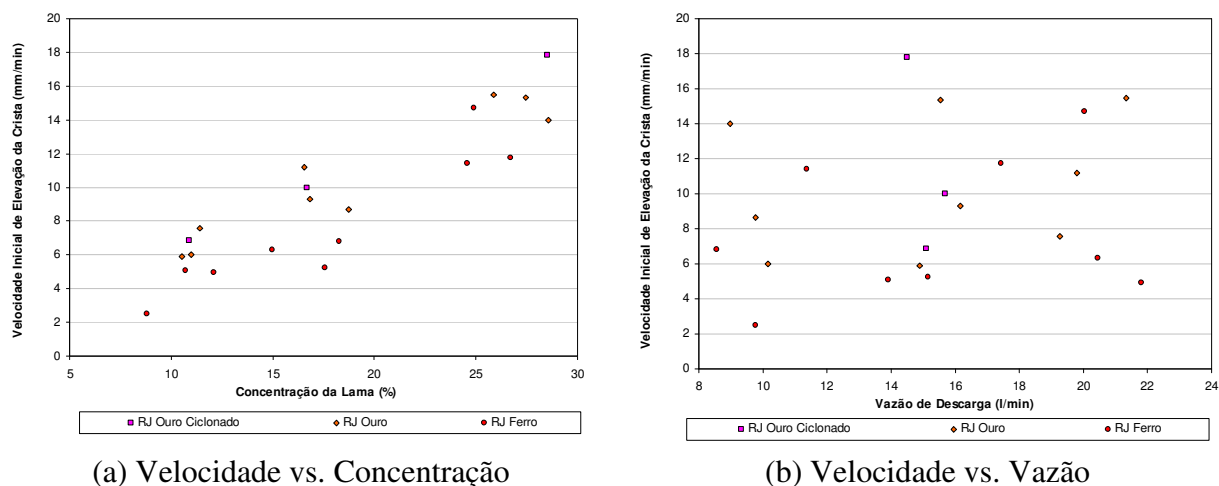


Figura 4.48 Variação da velocidade inicial de elevação da crista em função da concentração e da vazão para os três materiais estudados: (a) Velocidade vs. concentração; (b) Velocidade vs. vazão.

#### 4.4 AVALIAÇÃO CONJUNTA DE DIFERENTES RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA (ESDH)

A seguir será realizada uma avaliação conjunta de diferentes resultados obtidos nos ensaios de deposição hidráulica. Este processo de estudo visa relacionar os diferentes parâmetros que foram estudados e discutidos anteriormente e que, sabidamente, dentro da mecânica dos solos, apresentam relações entre si.

#### 4.4.1 Relação entre a Permeabilidade e o diâmetro efetivo $D_{10}$

Taylor (1948), citado por Lambe & Whitman (1994), determinou uma relação que visava representar a influência do fluido e das características do solo, tendo como base a lei de Poiseuille. Esta relação é baseada na concepção do fluxo através de meios porosos análogo ao que ocorre através de um sistema de tubos capilares, sendo dada por:

$$k = D_{10}^2 \frac{\gamma_w}{\mu} \frac{e^3}{(1+e)} C \quad (4.19)$$

Onde:

k: Coeficiente de permeabilidade de Darcy;

$D_{10}$ : Diâmetro efetivo das partículas;

$\gamma_w$ : Peso específico do fluido;

$\mu$ : Viscosidade do fluido;

e: Índice de vazios;

C: Fator de forma.

Posteriormente esta relação foi estudada e reinterpretada por Kozeny e melhorada por Carman dando origem a uma relação mais geral, que depende da forma dos poros e da relação entre o comprimento da trajetória real do fluxo e a camada percolada, assim como da superfície específica. A relação de Kozeny-Carman é dada por:

$$k = \frac{1}{k_o S^2} \frac{\gamma_w}{\mu} \frac{e^3}{(1+e)} \quad (4.20)$$

Onde:

$k_o$ : Fator que depende da forma dos poros e da relação entre o comprimento da trajetória real do fluxo e a espessura do estrato percolado;

S: Superfície específica.

Devido ao fato de  $S$  ser definido como o diâmetro das partículas que tem uma superfície específica  $S$ , a Equação 4.19 é considerada uma simplificação da relação de Kozeny-Carman (Equação 4.20).

Atualmente é sabido que o tamanho das partículas, o índice de vazios, a composição, a estrutura e o grau de saturação têm influência direta sobre a permeabilidade. As Equações 4.19 e 4.20 só consideram diretamente o tamanho das partículas e o índice de vazios, tanto que as outras características são tratadas de forma indireta ou ignoradas. Infelizmente é difícil isolar a influência de uma das propriedades, já que estas características se encontram estreitamente relacionadas umas com as outras.

A relação apresentada por Taylor (Equação 4.19) sugere que a permeabilidade varia com o quadrado de um certo diâmetro das partículas. É lógico pensar que, quanto menores sejam as partículas de solo, menores serão os vazios que contribuem para a formação dos canais de fluxo e, desta forma, menor será a permeabilidade. No entanto, este raciocínio só é razoável para os materiais de composição como a do silte ou a das areias, não devendo ser aplicada para os materiais argilosos, devido à ação das forças elétricas de superfície e à homogeneidade do tamanho das partículas na massa de solo.

Com este enfoque, em seu estudo de areias limpas, Hazen (1930), citado por Das (2001), propôs uma relação entre a permeabilidade e o diâmetro efetivo  $D_{10}$ . A Equação 4.21 apresenta a relação proposta por Hazen.

$$k = c \times D_{10}^2 \quad (4.21)$$

Sendo:

$k$ : Coeficiente de permeabilidade, em cm/s;

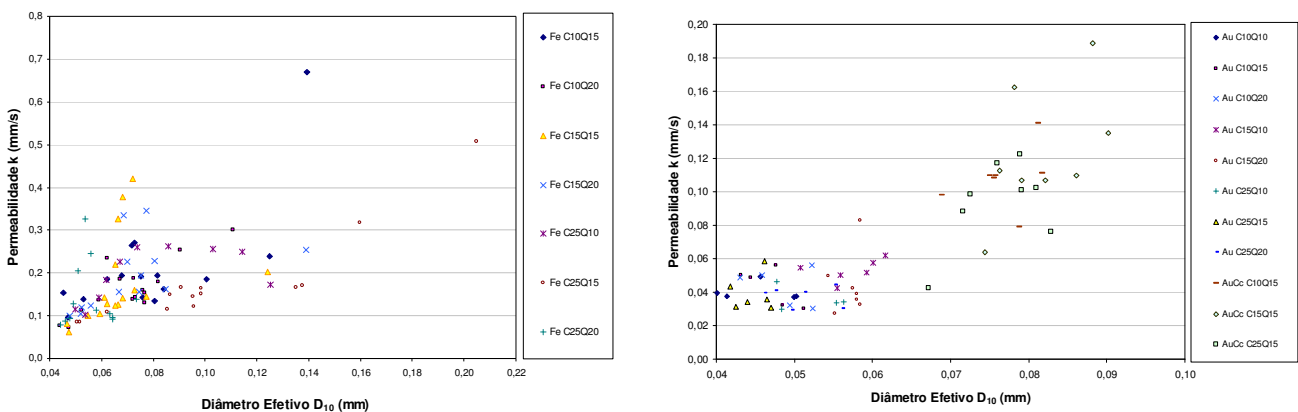
$c$ : Constante que varia entre 1,0 e 1,5;

$D_{10}$ : Diâmetro efetivo, em mm.

Esta relação tenta avaliar a influência da distribuição dos diâmetros do solo na variação da permeabilidade. No entanto, a complexidade da relação entre as diferentes propriedades que

influenciam a permeabilidade faz com que estas relações sejam restringidas a uma pequena faixa de materiais que se ajusta com um grande número de restrições.

Apesar das restrições anteriormente apresentadas para este tipo de análise, foi estudada a relação entre a permeabilidade e o diâmetro efetivo  $D_{10}$  para os três materiais estudados. A Figura 4.49 apresenta a relação gráfica entre a permeabilidade e o diâmetro efetivo  $D_{10}$  para o minério de ferro e os minérios de ouro.



(a) Rejeito de minério de ferro

(b) Rejeitos de minério de ouro

Figura 4.49 Relação entre a permeabilidade  $k$  e o diâmetro efetivo  $D_{10}$  para os três materiais estudados: (a) Rejeito de minério de ferro; (b) Rejeitos de minério de ouro.

Da Figura 4.49a, pode-se observar que, para o caso do rejeito de minério de ferro, outras propriedades têm uma alta influência na relação entre o diâmetro efetivo  $D_{10}$  e a permeabilidade. Esta alta variabilidade pode ser explicada pela alta influência que tem o conteúdo de ferro no diâmetro efetivo  $D_{10}$ , como foi apresentado por Hernandez (2002). Pequenas mudanças no conteúdo de ferro influenciam a distribuição granulométrica mudando o arranjo dos grãos e as demais propriedades que influenciam na permeabilidade.

A Figura 4.49b apresenta a relação entre a permeabilidade e o diâmetro efetivo  $D_{10}$  para os materiais de rejeito de minério de ouro. Observe-se como é possível identificar uma relação entre o aumento do diâmetro efetivo  $D_{10}$  e o incremento da permeabilidade dos depósitos obtidos hidraulicamente. Neste caso a influência do processo de segregação hidráulica sobre o peso específico dos grãos é menor, mas não desprezível, e a influência deste sobre a distribuição granulométrica, em particular sobre o diâmetro efetivo  $D_{10}$ , não é tão marcante quanto à apresentada pelo rejeito de minério de ferro.

A Figura 4.50 apresenta a regressão exponencial de melhor ajuste para os dados de permeabilidade  $k$  e diâmetro efetivo  $D_{10}$  dos rejeitos de minério de ouro estudados. Para este conjunto de 68 pontos foi possível o ajuste de uma relação exponencial com um coeficiente de ajuste de 0,725, o que permite ter uma noção da influência do diâmetro efetivo  $D_{10}$  na variação da permeabilidade para este material.

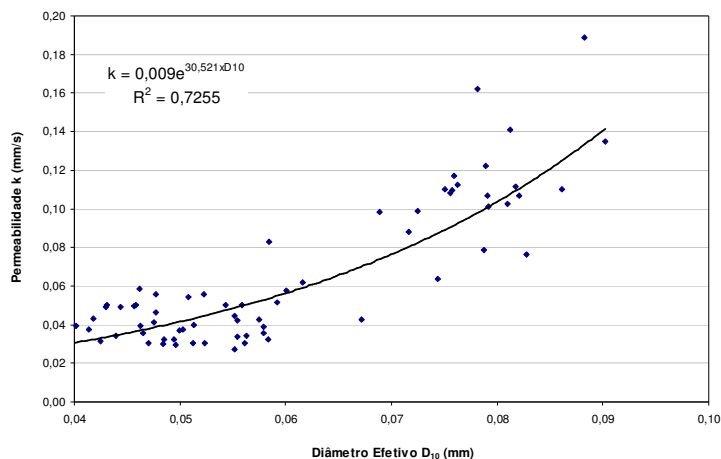
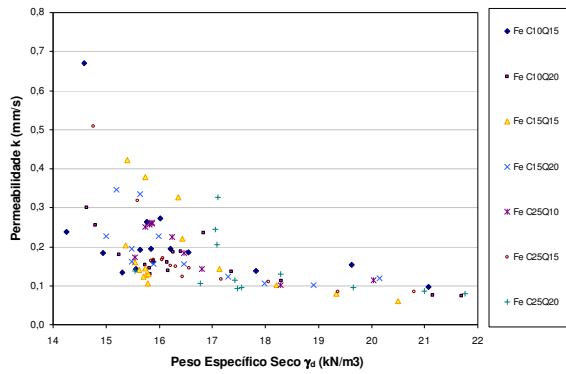


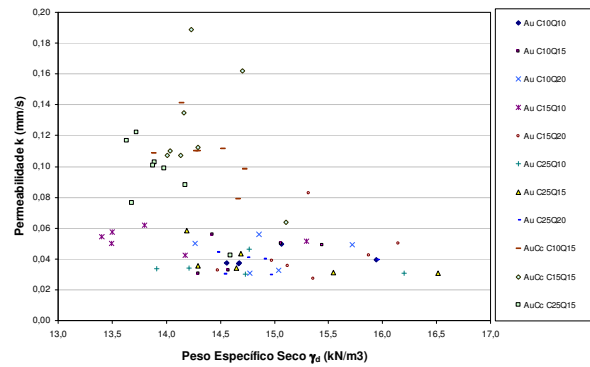
Figura 4.50 Relação entre a permeabilidade  $k$  e o diâmetro efetivo  $D_{10}$  para os materiais de rejeitos de minério de ouro.

#### 4.4.2 Relação entre a Permeabilidade e o Peso Específico Seco $\gamma_d$

A Figura 4.51 apresenta a relação entre os resultados experimentais de medição da permeabilidade nas praias de deposição e as determinações do peso específico seco nas mesmas praias. Observe-se da Figura 4.51a como a permeabilidade diminui na medida em que o peso específico seco aumenta. Esta relação pode ser explicada pela ação simultânea de dois fenômenos que se combinam para a obtenção de depósitos com estruturas mais fechadas. Inicialmente, estruturas mais densas ou fechadas apresentam vazios menores e, por conseqüência, menores permeabilidades. A isto se soma que, no caso dos rejeitos de minério de ferro, as partículas menores apresentam um alto conteúdo de ferro, como apresentado por Hernandez (2002). Assim, uma maior presença de partículas de diâmetros menores tem como resultado estruturas mais fechadas e com maiores conteúdos de ferro, tendo como resultado depósitos que apresentam peso específico seco maior e menor permeabilidade.



(a) Rejeito de minério de ferro



(b) Rejeitos de minério de ouro

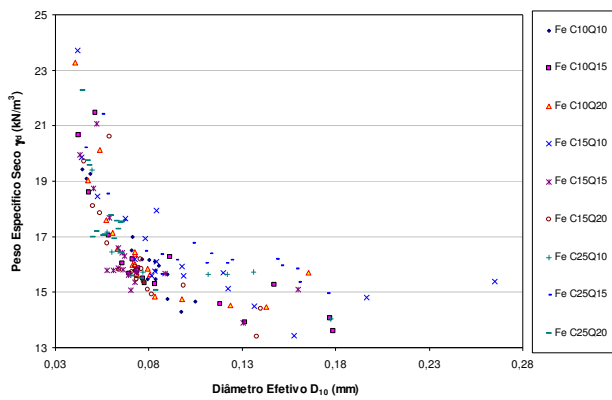
Figura 4.51 Relação entre a permeabilidade  $k$  e o peso específico seco  $\gamma_d$  para os três materiais estudados: (a) Rejeito de minério de ferro; (b) Rejeitos de minério de ouro.

No caso dos rejeitos de minério de ouro, Figura 4.51b, esta relação não é clara. Pode-se observar uma leve tendência de redução da permeabilidade com o aumento do peso específico seco, mas a relação não é tão marcante quanto a apresentada pelo rejeito de minério de ferro. Este comportamento se deve basicamente à mineralogia do material, que apesar de apresentar segregação hidráulica quando submetido ao processo de deposição hidráulica, não é determinante na formação das praias de deposição.

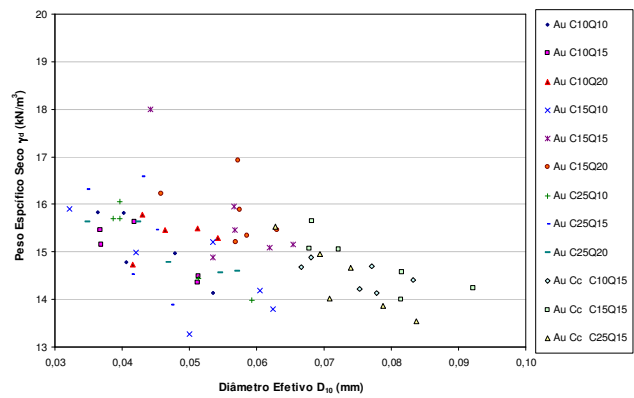
#### 4.4.3 Relação entre o peso específico seco e o diâmetro efetivo $D_{10}$

A Figura 4.52 apresenta a relação entre as determinações do peso específico seco ao longo das praias de deposição e as medições em laboratório do Diâmetro efetivo  $D_{10}$  das amostras obtidas das praias de deposição para os três materiais estudados. A Figura 4.52a apresenta os resultados obtidos para o caso do rejeito de minério de ferro. Observe-se claramente a influência do diâmetro efetivo  $D_{10}$  no comportamento do peso específico seco dos depósitos. A alta concentração de ferro nas partículas que apresentam diâmetros menores faz com que um pequeno aumento na proporção de partículas de diâmetros menores tenha um duplo impacto no aumento do peso específico seco. Por um lado, mais partículas de diâmetros menores representa uma estrutura mais fechada, com uma menor proporção de espaços vazios, e por outro lado, estas partículas apresentam um maior conteúdo de ferro, o que representa um peso específico das partículas médio maior para a massa de solo como um todo. Como consequência deste duplo efeito, depósitos de rejeito de minério de ferro que

apresentam uma maior proporção de partículas de diâmetros menores apresentam maior peso específico seco.



(a) Rejeito de minério de ferro



(b) Rejeitos de minério de ouro

Figura 4.52 Relação entre o peso específico seco  $\gamma_d$  e o diâmetro efetivo  $D_{10}$  para os três materiais estudados: (a) Rejeito de minério de ferro; (b) Rejeitos de minério de ouro.

No caso dos rejeitos de minério de ouro esta relação não é tão marcante e o efeito da presença de uma maior proporção de partículas de diâmetros menores se reflete em uma estrutura com uma menor proporção de espaços vazios, sem o efeito marcante da mineralogia no peso específico seco.



## **CAPÍTULO 5**

### **5. CONCLUSÕES**

#### **5.1 OBSERVAÇÕES DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA**

O processo de deposição dos materiais contidos na lama encontra-se condicionado tanto pela concentração, quanto pela vazão do fluxo. Ambas as variáveis condicionam a velocidade e a forma do fluxo no canal. Altas concentrações e baixas vazões geralmente são sinônimo da formação de um sistema meândrico de fluxo no canal, gerando uma deposição não homogênea no sentido transversal da praia. No entanto, a rápida deposição nas proximidades dos meandros faz com que estes apresentem uma migração lateral que em parte compensa a não homogeneidade transversal.

Ensaio com concentrações médias a baixas e vazões altas apresentam um regime de fluxo mais homogêneo no sentido transversal da praia. Após a saída da lama do controlador, o fluxo se distribui ao longo do canal, cobrindo toda a superfície da praia e permanecendo assim até a lagoa ao final da praia.

Outro fenômeno observado durante a realização dos ensaios de deposição, e que igualmente foi observado por Ribeiro (2000), foi o surgimento de processos erosivos regressivos, também chamados de antidunas. Este fenômeno é caracterizado por uma erosão localizada na região de maior fluxo que altera a configuração da praia, gerando a movimentação de depósitos que se pensavam já estabelecidos. Na medida em que os depósitos inferiores, que servem de apoio aos depósitos localizados na parte alta das praias, são movimentados e a estabilidade dos depósitos superiores é comprometida, com o passar do fluxo sua movimentação é iniciada. Uma possível causa de surgimento deste fenômeno é uma redução súbita do nível da lagoa,

que por menor que seja, dá início a um processo de desestabilização regressiva. O fenômeno também pode ser iniciado pela formação de ondas na lagoa.

## **5.2 CONCLUSÕES**

O estudo das propriedades dos rejeitos de minério de ferro e a maneira como eles são depositados nos aterros hidráulicos é fundamental para o domínio das etapas tecnológicas do processo de alteamento das estruturas construídas com este material. A avaliação de seu comportamento, durante e após o processo de deposição, permite o projeto de estruturas mais seguras e econômicas.

A resistividade elétrica dos solos granulares é uma importante ferramenta que pode ser empregada na avaliação das propriedades dos depósitos hidráulicos de rejeito de minério de ferro. Neste trabalho foi possível avaliar a influência do grau de saturação, da porosidade e do teor de ferro na variação desta propriedade. Estudos mais detalhados e uma campanha de ensaios de laboratório mais ampla permitirão um melhor entendimento de como esta propriedade é influenciada por estas variáveis, permitindo identificar claramente o peso do teor de ferro no comportamento do fator de formação, possibilitando, desta maneira, o emprego desta técnica na determinação das propriedades geotécnicas dos rejeitos de minério de ferro.

Os ensaios de congelamento de amostras de rejeito têm permitido o entendimento dos efeitos do processo de congelamento nas alterações que sofrem, durante a fase de congelamento, os materiais granulares. Foi possível comprovar que existe uma faixa de saturação na qual o material pode ser congelado apresentando uma mínima alteração na sua estrutura, representada pela mudança no índice de vazios, e facilitando a trabalhabilidade do material congelado. A utilização desta técnica de preparação de amostras deve ser executada com extrema atenção para não gerar grandes alterações nos corpos de prova que possam comprometer os resultados dos ensaios a serem realizados. No entanto, foi comprovada a funcionalidade da mesma, e não deve ser descartada como uma alternativa para a obtenção e amostras representativas.

O Ensaio de simulação de Deposição Hidráulica (ESDH) tem se mostrado uma ferramenta poderosa no estudo do comportamento dos aterros de rejeito depositados hidraulicamente. A capacidade com que estas simulações têm de avaliar as variáveis que influenciam o comportamento destes depósitos tem aberto grandes possibilidades para o entendimento deste fenômeno.

Dos ensaios de deposição hidráulica realizados foi possível concluir que a geometria das praias de deposição apresenta formas levemente côncavas. Estas formas são diretamente influenciadas pelas variáveis que controlam os processos de deposição como a concentração e a vazão de descarga. Mudanças nestas variáveis durante os processos de deposição induzem o início de um processo de ajuste, no qual a geometria da praia muda à procura de um novo perfil de equilíbrio. Alterações do nível base, nível da lagoa de deposição, geram alterações nas praias que podem chegar até a crista da mesma, provocando mudanças consideráveis na geometria do perfil de deposição.

Um acréscimo na concentração induz um aumento na viscosidade da lama, que tem como consequência um aumento na inclinação global das praias. Uma maior vazão de descarga representa uma lâmina de fluxo com maior profundidade, para a mesma largura do canal, possibilitando uma distância maior de transporte dos sólidos, e tendo como consequência, praias com concavidades menores.

Como foi possível observar no presente trabalho, o conhecimento do peso específico seco e sua distribuição no espaço é um dos fatores fundamentais no estudo do comportamento dos materiais de rejeito depositados hidraulicamente. Foi possível comprovar que a distribuição da densidade ao longo do perfil das praias está condicionada pela natureza do mesmo processo de deposição, assim como pela composição química e granulométrica do material de rejeito. Foi possível também avaliar o efeito do processo de ciclonagem na redução do peso específico seco dos depósitos, no caso dos rejeito de minério de ouro.

Mediante a avaliação do peso específico das partículas dos diferentes rejeitos estudados, foi possível evidenciar a importância do processo de segregação hidráulica na conformação das praias e na distribuição espacial de outras propriedades geotécnicas importantes. Para o material de rejeito de minério de ferro era esperado este comportamento. No entanto, a comprovação de que este fenômeno apresentava-se igualmente em rejeitos que não

apresentam uma marcada variação no peso específico dos minerais constituintes evidencia o poder de segregação dos processos de deposição hidráulica.

Do estudo das condições granulométricas ao longo das praias de deposição foi possível identificar a influência do processo de segregação hidráulica devido à forma de deposição. Na parte inicial das praias, perto do ponto de descarga, as partículas com peso específico maior são depositadas mais rapidamente, e geralmente estas partículas apresentam diâmetros menores. Na parte intermediária das praias são depositadas as partículas que apresentam maior volume (diâmetros maiores), entretanto com menor peso específico dos grãos. E, finalmente, no último trecho das praias se encontram as partículas mais finas. Estas partículas são geralmente a fração que fica em suspensão na água que compõe a lama e são arrastadas além do final das praias e depositam-se no ambiente subaquático, de baixa energia, na lagoa de decantação.

A análise das condições de distribuição do índice de vazios evidencia a necessidade da realização de uma avaliação detalhada das condições de liquefação dos depósitos conformados com o rejeito de minério de ouro, em especial os conformados com o rejeito de ouro ciclonado. Esta observação se faz devido a este segundo material apresentar um menor conteúdo de material fino, tendendo a apresentar, quando hidraulicamente depositado, uma estrutura mais porosa, com índice de vazios mais próximo do índice de vazios crítico. Nesta condição, um carregamento monotônico ou uma pequena deformação súbita, da fundação ou da barragem de contenção, podem induzir a um aumento súbito da poropressão. Neste sentido, sugere-se caso seja procedente uma avaliação dos parâmetros de resistência destes depósitos simulando diversas condições de densidade via ensaios triaxiais não drenados.

A realização de ensaios de permeabilidade nas praias do ESDH permitiu a obtenção de uma estimativa da propriedade, viabilizando o entendimento da distribuição espacial de  $k$  ao longo do perfil de deposição. Assim, foi possível concluir que o comportamento da permeabilidade ao longo das praias é uma função das variáveis que controlam o processo de segregação hidráulica e reflete o que acontece com a distribuição das partículas ao longo do depósito. As partes iniciais e finais da praia, que têm uma maior presença de materiais finos, têm permeabilidades mais baixas que a zona central, rica em materiais de diâmetro de partículas maiores.

A natureza do processo de beneficiamento influencia notoriamente as condições de permeabilidade das praias de deposição, sendo que foi possível verificar que as praias conformadas com o rejeito de ouro ciclonado apresentaram melhores condições de drenagem, com maiores valores de permeabilidade, que os depósitos conformados com o rejeito de ouro não ciclonado.

O acompanhamento da altura da crista durante a realização do ensaio permitiu identificar a importância da concentração de sólidos da lama na evolução deste elemento que, de certa forma, define a geometria da praia. Este procedimento permitiu igualmente identificar, de forma precisa, as taxas de crescimento da altura da crista, sendo este dado importante para a modelagem numérica do processo de deposição.

### **5.3 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

Como sugestões para a continuação desta linha de pesquisa devem ser realizadas diferentes atividades que busquem esclarecer as inquietudes identificadas da análise dos resultados discutidos no presente trabalho.

A realização de novos ensaios de resistividade elétrica, tanto nos materiais já estudados, quanto em novos materiais de rejeito que apresentem teores de ferro intermediários. Esta metodologia permitirá uma melhor identificação do comportamento elétrico do rejeito e possibilitará a avaliação mais apurada da real influência do teor de ferro nesta propriedade.

A realização de ensaios de congelamento em amostras de rejeito com diferentes índices de vazios e graus de saturação será fundamental para um melhor entendimento da influência destas propriedades nas alterações sofridas pelo rejeito quando submetido ao processo de congelamento. O aprofundamento neste estudo permitirá uma melhor compreensão desta técnica alternativa para a obtenção de amostras, com o objetivo da realização de ensaios de laboratório.

Uma nova campanha de ensaios de laboratório no ESDH com o objetivo de ampliar a base de dados para maiores concentrações e vazões, tentando chegar mais perto das reais observadas em campo. Para isto, devem ser melhoradas ainda mais as condições do equipamento.

Adicionalmente, deve ser feita uma melhor caracterização das amostras obtidas, tanto nos ensaios já realizados quanto nos que ainda serão realizados. Nesta caracterização destacam-se ensaios como granulometria, massa específica dos grãos, entre outros. Esta caracterização das amostras permitirá confirmar e ajustar as observações já realizadas.

Uma avaliação das condições de liquefação dos rejeitos de minério de ouro, em especial o rejeito de minério de ouro ciclonado que apresentou índices de vazios elevados. Esta avaliação poderá ser realizada em depósitos simulados hidráulicamente no ESDH, com a adaptação de placas vibratórias ou com a aplicação de cargas monotônicas. Também podem ser retiradas amostras indeformadas dos depósitos simulados para a realização de ensaios triaxiais cíclicos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. (1993a). Elaboração e apresentação de projeto de disposição de rejeitos de beneficiamento, em barramento, em mineração. NBR 13028, Rio de Janeiro, RJ, 10 p.
- ABNT. (1993b). Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril, em pilha, em mineração. NBR 13029, Rio de Janeiro, RJ, 8 p.
- ABRÃO, P.C. (1987). Sobre a Deposição de Rejeitos de Mineração no Brasil. Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, REGEO'87, Rio de Janeiro, RJ, pp. 1-10.
- AMORIM, N., CASTRO, W. & GALBIATTI, H. (2005). Avaliação de segurança e ajuste construtivo de barragens de contenção de sedimentos no complexo minerador de Itabira, Minas Gerais. 11º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, ABGE, Florianópolis, SC, pp. 1792-1804.
- 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.
- BLIGHT, G.E. (1994). The master profile for hydraulic fill tailings beaches. Proc. Institute of Civil Engineering Geotechnical Engineering, 107: 27-40.
- BLIGHT, G.E; THOMSON, R.R. & VORSTER, K. (1985). Profiles of hydraulic fill tailings beaches and seepage trough hydraulically sorted tailings. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 85(5): 157-161.
- BOLTON, M.D. (1986). The Strength and Dilatancy of Sands. Géotechnique, The Institution of Civil Engineers, London, 31(1): pp. 65-78.
- BOLTON, M.D. (1987a). The strength and dilatancy of sands. Géotechnique, The Institution of Civil Engineers, London, 37(2): pp. 219-226.
- BOLTON, M.D., (1987b). Discussion, The strength and dilatancy of sands. Géotechnique, The Institution of Civil Engineers, London, 37(4): pp. 517.
- BORMA, L.DeS., SOARES, P.S. (2002). Drenagem Acida e Gestão de Resíduos Sólidos de Mineração . In.: Extração de Ouro - Princípios, Tecnologia e Meio Ambiente. Rio Janeiro, RJ, pp. 243-266.
- BOULANGER, R.W. & SEED, R.B. (1995). Liquefaction of sand under bidirectional monotonic and cyclic loading. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE-GED, USA, 121(12): pp. 870-878.

- BUSCH, R.G., ABRÃO, P.C., OLIVEIRA S.L., ABRÃO, G.S. & NETO, A.C. (1999). Barragem Executada com Rejeitos de Minério de Ferro. 4º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, REGEO'99, São José dos Campos, SP, pp. 169-179.
- CASTRO, G. (1969). Liquefaction of Sands. Thesis of Doctoral. Harvard University, Cambridge, 231 p.
- CAVALCANTE, A.L.B. (2000). Efeito do Gradiente de Permeabilidade na Estabilidade de Barragens de Rejeito Alteadas pelo Método de Montante. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- CAVALCANTE, A.L.B. & ASSIS, A., (2002a). Considerações geométricas para perfis de deposição hidráulica aplicadas ao projeto de barragens de rejeito. 10º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Ouro Preto, MG.
- CAVALCANTE, A.L.B. & ASSIS, A. (2002b). Transporte por arraste de sedimentos granulares heterogêneos acoplado ao mecanismo de tensão-deformação-poropressão aplicado às barragens de rejeito. XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG, ABMS, São Paulo, SP.
- CAVALCANTE, A.L.B., ASSIS, A. & RIBEIRO, L.F., (2002). Modelo laboratorial e físico-matemático de transporte de sedimentos de rejeitos granulares mistos (partículas de quartzo e ferro). XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG, ABMS, São Paulo, SP.
- CAVALCANTE, A.L.B. & ASSIS, A. (2003). Transporte por arraste de sedimentos heterogêneos provenientes da mineração do ferro. V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, REGEO'2003, Porto Alegre, RS.
- CAVALCANTE, A.L.B., HERNANDEZ, H.M., ASSIS, A.P. & PALMEIRA, E.M. (2003). Extensão da relação ângulo de Atrito-Tensão-Densidade de Bolton (1986) a rejeitos granulares de minério de ferro. V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, REGEO'2003, Porto Alegre, RS.
- CIMINELLI, V.T., GOMES, A.D. (2002). Princípios da Cianetação. In.: Extração de Ouro - Princípios, Tecnologia e Meio Ambiente. Rio Janeiro, RJ, pp. 51-86.
- COSTA JUNIOR, C.N., (1997). Caracterização Mineralógica dos Diferentes Tipos de Minérios e Concentrado de Flotação da Mina Morro do Ouro, Paracatú-Mg. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 161 p.
- DANIEL, C. (1997). An Investigation of the Factors Affecting Bulk Soil Electrical Resistivity. The University of British Columbia. USA. 62 p.
- DAS, B.M. (2001). Fundamentos de Ingenieria Geotécnica. Thomson Learning. ISBN: 970-686-061-4, Mexico, DF, 594p.
- DE GROOT, M.B.; HEEZEN, F.T.; MASTBERGEN, D.R. & STEFESS, H. (1988). Slopes and density of hydraulic place sands. Hydraulic fill structures. ASCE, Geotech Special Publication n° 21, D.J.A. Van Zyl & S.G. Vick (eds.), pp.32-51.
- DEPARTMENT OF MINERALS AND ENERGY WESTERN AUSTRALIA, (1998). Guidelines on the Development of an Operating Manual for Tailings Storage. ISBN: 0-7309-7805-2, Australia, 33p.



- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, (1994). Technical Report: Design and Evaluation of Tailings Dams. EPA530-R-94-038, Washington, USA, 59p.
- ESPÓSITO, T.J. (1995). Controle Geotécnico da Construção de Barragens de Rejeito – Análise de Estabilidade de Taludes e Estudos de Percolação. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 159 p.
- ESPÓSITO, T.J. & ASSIS, A. (1997). Resultados preliminares de ensaios geotécnicos de campo e laboratório nas pilhas do Xingu (Mina de Alegria) e Monjolo (Mina de Morro Agudo). Publicação G.RE-090A/97, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, Brasília, DF, 127 p.
- ESPÓSITO, T.J., ASSIS, A. & RIBEIRO, L.F.M. (1997). Una alternativa de Control de la Calidad de la Construcción de Represas para escoria. 4º Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica, Chile, pp. 455-468.
- ESPÓSITO, T.J. & ASSIS, A. (1998). Análise comparativa da variabilidade de parâmetros geotécnicos entre diferentes alteamentos de uma barragem de rejeito. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG, ABMS, Brasília, DF, pp. 1797-1804.
- ESPÓSITO, T.J. & ASSIS, A. (1999). Método Probabilístico Acoplado ao Método Observacional Aplicado a Barragens de Rejeito. 4º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, REGEO'99, São José dos Campos, SP, pp. 187-194.
- ESPÓSITO, T.J. (2000). Metodologia Probabilística e Observacional Aplicada a Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 363 p.
- ESPÓSITO, T.J., ASSIS, A. & GIOVANNINI, M. (2000). Influence of the variability of geotechnical parameters upon the liquefaction potential of tailings dams. 5<sup>th</sup> International Symposium on Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development, Belo Horizonte, MG.
- FAN, X. & MASLIYAH, J. (1990). Laboratory investigation of beach profile in tailings disposal. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 116(11):1357-1373.
- FERREIRA, R.C.; PERES, J.E.E. & MONTEIRO, L.B. (1980). Geotechnical characteristics of hydraulic fill scale models. 13<sup>th</sup> Brazilian National Conference of Large Dam, CBGB, Rio de Janeiro, RJ, pp. 496-516.
- FILIMONOV, V. (1979). Relatório técnico sobre o aterro hidráulico da Usina de Porto Primavera. Themag Engenharia, 56 p.
- FINN, W.D. (2002). State of the art for the evaluation of seismic liquefaction potential. Computers and Geotechnics, 29:pp. 329-341.
- FOURIE, A. (1988). Beaching and permeability properties of tailings. ASCE, Geotech Special Publication n° 21, D.J.A. Van Zyl & S.G. Vick (eds.), pp.142-154.
- FREITAS, L.R., COSTA, R.S. (2002). Recuperação do Ouro Dissolvido. In.: Extração de Ouro - Princípios, Tecnologia e Meio Ambiente. Rio Janeiro, RJ, pp. 87-125.
- GIPSON, A.H., (2003). Tailing dam failures - the human factor. Proceedings of the Tenth International Conference on Tailings and Mine Waste, Vail, Colorado, USA, pp. 451-456.

- GOMES, R.C. (1993). Interação solo-reforço e mecanismos de ruptura em solos reforçados com geotêxteis. Tese de Doutorado, EESC/USP, 270 p.
- GOMES, R.C., PEREIRA, E.L. & RIBEIRO, L.F. (2002). Avaliação do potencial de liquefação de rejeitos de mineração. XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG, ABMS, São Paulo, SP, pp. 91-101.
- GOMES, R.C., RIBEIRO, L.F., BOTELHO, A.P. & PEREIRA, E.L. (2002). Caracterização tecnológica de rejeitos de mineração em sistemas de disposição. 10º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Ouro Preto, MG.
- GUMIERI, A.G., BUENO, B.S., LIMA, D.C. & MINETTE, E. (1995). Estudo do Potencial de Liquefação de Rejeitos de Mineração de Ferro sob Carga Estática. III Simpósio Sobre Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, REGEO'95, ABMS/ ABGE/ CBGB, MG, pp. 59-68.
- HERNANDEZ, H.M. (2002). Caracterização Geomecânica de Rejeitos de Minério de Ferro Aplicada a Barragens de Aterro Hidráulico. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF., 174 p.
- HERNANDEZ, H.M., ASSIS, A.P. (2002a). Influência do Conteúdo de Ferro na Resistência de Rejeitos de Minério de Ferro. 10º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, CBGE, Ouro Preto, MG.
- HERNANDEZ, H.M., ASSIS, A.P. (2002b). Caracterização Geomecânica de Rejeitos de Minério de Ferro Aplicada a Barragens de Aterro Hidráulico. XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG, ABMS, São Paulo, SP.
- HERNANDEZ, H.M., ASSIS, A.P. & CAVALCANTE, A.L.B. (2002). Avaliação dos Parâmetros de Resistência de Rejeitos de Minério de Ferro sob Diferentes Esforços de Confinamento. XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG, ABMS, São Paulo, SP.
- HOOKE, R.L. (1968). Model geology: prototype and laboratory streams: Discussion. Geological Society of America Bulletin, 79:391-394.
- ICOLD & UNEP-PNUE (2001). Tailings Dams Risk of Dangerous Occurrences: Lessons learnt from practical experiences. Bulletin 121. Published by the International Commission on Large Dams, Paris, 144p.
- JONES, R.H. (1995). Properties of freezing, frozen and thawed soils. Ground Freezing in Practice. Harris J.S. (ed), Tomas Telford, ISBN: 0-7277-1995-5, London, pp. 26-69.
- KINOSITA, S. (1979). Effects of initial soil-water conditions on frost heaving characteristics. Engineering Geology, Amsterdam, 13: pp. 41-52.
- KRAMER, S.L. (1985). Liquefaction of Sands Due to Non-Seismic Loading. Thesis of Doctoral. University of California, Berkeley, 368 p.
- KÜPPER, A.G., MORGENSTERN, N.R. & SEGO, D.C. (1992a). Laboratory tests to study hydraulic fill. Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, 29: pp. 405-417.
- KÜPPER, A.G., MORGENSTERN, N.R. & SEGO, D.C. (1992b). Comparison between various flume tests used for hydraulic-fill studies. Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, 29: pp. 418-425.
- LAMBE, T.M. & WHITMAN, R.V. (1994). Mecânica de Suelos. Ed. Limusa, México, 582 p.

- LOPES, M.C.O. (2000). Disposição hidráulica de rejeitos arenosos e influência nos parâmetros de resistência. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 157 p.
- MENESES, P.R.; PONTARA, R.C.P.; SILVA, F.H.F. & MADEIRA, J.C. (2001). Comportamento da Refletância Espectral de Filitos Carbonosos Mineralizados em Ouro. Revista Brasileira de Geociências, Sociedade Brasileira de Geologia, São Paulo, SP, 31(1): pp. 83-88.
- PARLIAMENTARY COMMISSIONER FOR THE ENVIRONMENT, (1997). Long-Term Management of the Environmental Effects of Tailings Dams. ISBN: 0-908804-77-6, Wellington, New Zeland, 104p.
- PARRA, P.C. & LASMAR, N.T. (1987). Ruptura da Barragem de Rejeitos da Mina do Fernandinho. Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, REGEO'87, Rio de Janeiro, RJ, pp. 423-444.
- PARRA, P.C. & RAMOS, J.V. (1987). Ruptura, recuperação e estabilização da Barragem de Rejeitos da Mina do Pico São Luiz. Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, REGEO'87, Rio de Janeiro, RJ, pp. 445-462.
- PERES, A.E.C., CHAVES, A.P.; LINIS, F.A.F. & TOREM, M.M.L. (2002). Beneficiamento de Minérios de Ouro. In.: Extração de Ouro - Princípios, Tecnologia e Meio Ambiente, Rio Janeiro, RJ, pp. 15-50.
- POLITO, C.P. & MARTIN, J.R. (2001). Effects of no-plastic fines on the liquefaction resistance of sands. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE-GED, USA, 127(5): pp. 408-415.
- POULOS, S.J., CASTRO, G., & FRANCE, J.W. (1985). Liquefaction evaluation procedure. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE-GED, USA, 111(6): pp. 772-791.
- PRESOTTI, E.S., (2002). Influência do Teor de Ferro nos Parâmetros de Resistência de um Rejeito de Minério de Ferro. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 153 p.
- RIBEIRO, L.F., ASSIS, A. & ESPÓSITO, T.J. (1998). Efeito das Variáveis de Deposição Hidráulica no Comportamento Geotécnico de Barragens de Rejeito. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG, ABMS, Brasília, DF, pp. 1869-1876.
- RIBEIRO, L.F. & ASSIS, A. (1999). Modelagem Física do Processo de Deposição Hidráulica Associado a Barragens de Rejeitos. 4º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, REGEO'99, São José dos Campos, SP, pp. 195-202.
- RIBEIRO, L.F. (2000). Simulação Física do Processo de Formação dos Aterros Hidráulicos Aplicado a Barragens de Rejeitos. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 235 p.
- RIBEIRO, L.F., PRESOTTI, E.S. & PEREIRA, E.L. (2003). Influência do teor de ferro nos parâmetros de resistência de um rejeito de minério de ferro. V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, REGEO'2003, Porto Alegre, RS.
- SARRIA, A. (1996). Métodos Geofísicos com Aplicaciones a la Ingenieria Civil. Ediciones Uniandes, Santa Fe de Bogotá, DC, 371p.

- SEED, H.B., SINGH, S., CHAN, C.K. & VILELA, T.F. (1982). Consideration in undisturbed sampling of sand. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, USA*, 108(GT2): pp. 265-283.
- SHRP, J.J. (1981). *Hydraulic Modelling*. Butterworth, London, UK, 242 p.
- TIBANA, S., DE CAMPOS, T.M.P. & BERNARDES, G.P. (1998). Características de resistência não drenada em compressão e extensão de um resíduo de mineração de ferro. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG, ABMS, Brasília, DF, pp. 1829-1844.
- TING, J.M., MARTIN, R.T. & LADD, C.C. (1983). Mechanisms of strength for frozen sand. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE-GED, USA*, 109(10): pp. 1286-1302.
- ULRICH, B.F. & FOURIE, A.B., (2003). Assessment of the potential for static liquefaction of a tailings dam using laboratory and field testing. *Proceedings of the Tenth International Conference on Tailings and Mine Waste, Vail, Colorado, USA*, pp. 137-147.
- VAID, Y.P. & FINN, D.L. (1979). Static shear and liquefaction potential. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE-GED, USA*, 105(10): pp. 1233-1246.
- VAID, Y.P. & NEGUSSEY, D. (1988). Preparation of reconstituted sand specimens. *Advanced triaxial testing of soils and rocks, ASTM, Philadelphia, USA*, pp. 405-417.
- WINTERWERP, J.C.; BAKKER, W.T.; MASTBERGEN, D.R. & VAN ROSSUM, H. (1992). Hyperconcentrated sand-water mixture flow over erodible bed. *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, 118(11): 1508-1525.
- WINTERWERP, J.C.; DE GROOT, M.B.; MASTBERGEN, D.R. & VERWOERT, H. (1990). Hyperconcentrated sand-water mixture flow over flat bed. *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, 116(1): 36-55.
- YALIN, M.S. (1971). *Theory of Hydraulics Models*. Macmillan, London, UK, 266 p.
- YOSHIMI, Y. & GOTO, S. (1996). Technical Note: Liquefaction resistance of silty sand based on in situ frozen samples. *Géotechnique, The Institution of Civil Engineers, London*. 46(1): pp. 153-156.
- YOUD, T.L. & IDRIS, I.M. (2001). Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshop on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE-GED, USA*, 127(4): pp. 297-313.

## APÊNDICE A

ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO DOS MATERIAIS Q E Fe  
PARA A DETERMINAÇÃO DA QUEDA DE VOLTAGEM

Tabela A.1 Determinação da resistividade do material Q em condições controladas

Data : 12/2/2004

Tipo de Solo : Material de Quartzo

Volume (cm<sup>3</sup>) : 6070,4

$\rho_s$  (g/cm<sup>3</sup>) : 2,69

wh (%) : 0,06

Condutividade Agua (ms): 0,149

Resistividade Agua Destilada ( $\rho_w$ ): 0,007 ohm-m

Resistividade do Meio Saturado ( $\rho_o$ ): 0,186 ohm-m

n (%)	e (%)	S (%)	W <sub>s</sub> (g)	W <sub>uh</sub> (g)	$\Delta W_{uw}$ (g)[2]	V <sub>w</sub> (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V_w$ (cm <sup>3</sup> )[3]	W <sub>uw</sub> (g)[1]	w <sub>f</sub> (%)	S <sub>final</sub> (%)	w (%)	W <sub>w</sub> (g)	W <sub>s</sub> (g)	V <sub>T</sub> (cm <sup>3</sup> )	e <sub>r</sub> (%)	n <sub>r</sub> (%)	S <sub>r</sub>		T (°C)	Cond Med (ms)	Resist	Fator F ( $\rho_s/\rho_w$ )
																	(%)	(%)				
38	0,613	0,26	10124,2	10130,3	-	0,0	-	10130,3	0,06	0,26	0,07	10130,3	10123,2	6070,4	0,613	0,38	0,3	0,00	27,5	1,850	0,541	80,6
41	0,695	0,23	9634,3	9640,1	490,2	0,0	-	9640,1	0,06	0,23	0,07	9640,1	9633,4	6070,4	0,695	0,41	0,3	0,00	27,0	1,860	0,538	80,2
45	0,818	0,20	8981,2	8986,5	653,6	0,0	-	8986,5	0,06	0,20	0,07	8986,5	8980,2	6070,4	0,818	0,45	0,2	0,00	27,0	1,702	0,588	87,6
48	0,923	0,17	8491,3	8496,4	490,2	0,0	-	8496,4	0,06	0,17	0,07	8496,4	8490,4	6070,4	0,923	0,48	0,2	0,00	27,0	1,431	0,699	104,2
38	0,613	25	10124,2	10130,3	-	570,6	-	10700,9	5,70	25,00	4,87	10700,9	10203,6	6070,4	0,600	0,38	21,8	0,22	26,0	3,602	0,278	41,4
41	0,695	25	9634,3	9640,1	517,8	616,4	73,7	10256,8	6,46	25,01	5,91	10256,8	9684,0	6070,4	0,686	0,41	23,2	0,23	26,0	3,448	0,290	43,2
45	0,818	25	8981,2	8986,5	695,4	677,5	103,3	9664,8	7,61	25,03	7,30	9664,8	9007,5	6070,4	0,813	0,45	24,1	0,24	26,0	3,250	0,308	45,9
48	0,923	25	8491,3	8496,4	527,2	723,4	83,1	9220,7	8,59	25,03	8,78	9220,7	8476,5	6070,4	0,926	0,48	25,5	0,25	26,0	3,204	0,312	46,5
38	0,613	50	10124,2	10130,3	-	1147,3	-	11277,6	11,39	50,00	10,49	11277,6	10206,8	6070,4	0,600	0,37	47,0	0,47	26,0	4,806	0,208	31,0
41	0,695	50	9634,3	9640,1	545,7	1238,7	147,2	10879,1	12,92	50,01	12,55	10879,1	9666,4	6070,4	0,689	0,41	49,0	0,49	26,0	4,772	0,210	31,2
45	0,818	50	8981,2	8986,5	737,6	1360,5	206,2	10347,7	15,22	50,03	14,98	10347,7	8999,9	6070,4	0,814	0,45	49,5	0,49	26,0	4,563	0,219	32,7
48	0,923	50	8491,3	8496,4	564,4	1451,8	165,9	9949,2	17,17	50,03	16,48	9949,2	8541,5	6070,4	0,912	0,48	48,6	0,49	26,0	4,390	0,228	34,0
38	0,613	100	10124,2	10130,3	-	2300,7	-	12431,0	22,78	100,00	15,90	12431,0	10725,3	6070,4	0,523	0,34	81,9	0,82	26,0	4,802	0,208	31,1
41	0,695	100	9634,3	9640,1	601,5	2483,1	294,0	12123,5	25,84	100,01	21,21	12123,5	10002,4	6070,4	0,633	0,39	90,2	0,90	25,8	4,981	0,201	29,9
45	0,818	100	8981,2	8986,5	821,9	2726,3	412,0	11713,5	30,42	100,03	23,12	11713,5	9513,6	6070,4	0,716	0,42	86,8	0,87	25,7	5,023	0,199	29,7
48	0,923	100	8491,3	8496,4	638,9	2908,7	331,4	11406,0	34,33	100,03	24,83	11406,0	9137,4	6070,4	0,787	0,44	84,9	0,85	25,5	5,081	0,197	29,3
38	0,613	90	10124,2	10130,3	-	2070,0	-	12200,3	20,51	90,00	18,09	12200,3	10330,9	6070,4	0,581	0,37	83,8	0,84	26,0	5,123	0,195	29,1
40	0,667	90	9797,6	9803,5	393,6	2179,5	176,4	11983,2	22,31	90,01	20,06	11983,2	9980,7	6070,4	0,636	0,39	84,8	0,85	25,8	5,406	0,185	27,6
42	0,724	90	9471,0	9476,7	399,4	2288,9	182,3	11766,0	24,23	90,02	22,02	11766,0	9643,0	6070,4	0,693	0,41	85,4	0,85	25,7	5,750	0,174	25,9
44	0,786	90	9144,5	9149,9	405,7	2398,4	188,6	11548,9	26,29	90,02	24,41	11548,9	9283,3	6070,4	0,759	0,43	86,5	0,86	25,5	6,640	0,151	22,5
46	0,852	90	8817,9	8823,2	412,5	2507,9	195,3	11331,8	28,51	90,03	26,28	11331,8	8973,8	6070,4	0,820	0,45	86,2	0,86	25,7	6,059	0,165	24,6
48	0,923	90	8491,3	8496,4	419,7	2617,3	202,6	11114,7	30,90	90,03	27,28	11114,7	8732,8	6070,4	0,870	0,47	84,3	0,84	25,5	5,633	0,178	26,5
50	1,000	90	8164,7	8169,6	427,5	2726,8	210,4	10897,5	33,47	90,04	27,81	10897,5	8526,1	6070,4	0,915	0,48	81,7	0,82	25,5	5,219	0,192	28,6

Onde :

n : Porosidade (%);

n<sub>r</sub> : Porosidade real (%);

e : Índice de vazios;

e<sub>r</sub> : Índice de vazios real;

S : Porcentagem de saturação esperado (%);

S<sub>final</sub> : Porcentagem de saturação final (%);

S<sub>r</sub> : Porcentagem de saturação real (%);

W<sub>s</sub> : Peso dos sólidos (g);

W<sub>h</sub> : Umidade higroscópica (%);

W<sub>f</sub> : Umidade final esperada (%);

w : Umidade real (%)

W<sub>uh</sub> : Peso dos sólidos úmidos na umidade w<sub>h</sub> (g);

W<sub>uw</sub> : Peso dos sólidos úmidos na umidade w<sub>f</sub> (g);

V<sub>w</sub> : Volume de água (cm<sup>3</sup>);

V<sub>T</sub> : Volume total da amostra (cm<sup>3</sup>)

$\Delta V_w$  : Diferença de volume de água a ser acrescentado (cm<sup>3</sup>);

$\Delta W_{uw}$  : Diferença de peso de material a ser acrescentado (g);

T : Temperatura (°C);

C<sub>ond</sub> M<sub>ed</sub> : Condutividade media (ms);

Resist : Resistividade media (Ohm.m);

Fator F : Fator de formação ( $\rho_s/\rho_w$ ).

Tabela A.2 Determinação da resistividade do material Fe em condições controladas

Data : 12/2/2004

Tipo de Solo : Material de Ferro

Nota :

Volume (cm<sup>3</sup>) : 6070,4

$\rho_s$  (g/cm<sup>3</sup>) : 4,60

wh (%) : 0,11

Condutividade Agua Destilada (ms): 0,190

Resistividade Agua Destilada ( $\rho_w$ ): 0,005 ohm-m

Resistividade do Meio Saturado ( $\rho_0$ ): 0,103 ohm-m

n (%)	e	S (%)	W <sub>s</sub> (g)	W <sub>uh</sub> (g)	$\Delta W_{uw}$ (g)[2]	V <sub>w</sub> (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V_w$ (cm <sup>3</sup> )[3]	W <sub>uw</sub> (g)[1]	w <sub>f</sub> (%)	S <sub>final</sub> (%)	w (%)	W <sub>uw</sub> (g)	W <sub>s</sub> (g)	V <sub>T</sub> (cm <sup>3</sup> )	e <sub>r</sub>	nr (%)	S <sub>r</sub>		T (°C)	Cond Med (ms)	Resist (Ohm.m)	Fator F ( $\rho_s/\rho_w$ )
																	(%)	(%)				
40	0,667	0,76	16754,3	16772,7	-	0,0	-	16772,7	0,11	0,76	0,11	16772,7	16754,7	6070,4	0,667	0,40	0,7	0,01	27,0	3,096	0,323	61,4
43	0,754	0,67	15916,6	15934,1	838,6	0,0	-	15934,1	0,11	0,67	0,11	15934,1	15917,0	6070,4	0,754	0,43	0,7	0,01	26,8	3,078	0,325	61,7
47	0,887	0,57	14799,6	14815,9	1118,2	0,0	-	14815,9	0,11	0,57	0,11	14815,9	14800,0	6070,4	0,887	0,47	0,6	0,01	26,5	2,529	0,395	75,1
51	1,041	0,49	13682,7	13697,7	1118,2	0,0	-	13697,7	0,11	0,49	0,11	13697,7	13683,0	6070,4	1,041	0,51	0,5	0,00	26,5	2,242	0,446	84,7
40	0,667	25	16754,3	16772,7	-	588,6	-	17361,3	3,62	25,00	3,56	17361,3	16764,4	6070,4	0,666	0,40	24,6	0,25	26,0	4,014	0,249	47,3
43	0,754	25	15916,6	15934,1	868,1	635,1	76,8	16570,1	4,11	25,04	3,93	16570,1	15944,1	6070,4	0,751	0,43	24,0	0,24	26,0	3,581	0,279	53,1
47	0,887	25	14799,6	14815,9	1162,8	697,0	107,8	15515,1	4,83	25,08	4,58	15515,1	14836,0	6070,4	0,882	0,47	23,9	0,24	26,0	3,610	0,277	52,6
51	1,041	25	13682,7	13697,7	1170,9	758,9	115,9	14460,0	5,68	25,11	5,35	14460,0	13725,4	6070,4	1,034	0,51	23,8	0,24	26,0	3,741	0,267	50,8
40	0,667	50	16754,3	16772,7	-	1195,7	-	17968,4	7,25	50,00	7,15	17968,4	16770,1	6070,4	0,665	0,40	49,4	0,49	26,5	6,783	0,147	28,0
43	0,754	50	15916,6	15934,1	898,4	1287,6	152,7	17222,6	8,21	50,04	8,02	17222,6	15943,5	6070,4	0,751	0,43	49,1	0,49	26,5	6,632	0,151	28,6
47	0,887	50	14799,6	14815,9	1208,6	1410,3	214,3	16228,3	9,65	50,08	9,29	16228,3	14849,1	6070,4	0,881	0,47	48,5	0,49	26,5	9,514	0,105	20,0
51	1,041	50	13682,7	13697,7	1224,8	1532,9	230,5	15234,0	11,34	50,11	11,02	15234,0	13722,4	6070,4	1,035	0,51	49,0	0,49	26,3	7,498	0,133	25,3
40	0,667	75	16754,3	16772,7	-	1802,7	-	18575,4	10,87	75,00	12,50	18575,4	16511,5	6070,4	0,691	0,41	83,2	0,83	26,0	8,085	0,124	23,5
43	0,754	75	15916,6	15934,1	928,8	1940,2	228,6	17875,2	12,31	75,04	14,43	17875,2	15620,4	6070,4	0,788	0,44	84,3	0,84	26,0	9,285	0,108	20,5
47	0,887	75	14799,6	14815,9	1254,4	2123,5	320,8	16941,6	14,47	75,08	14,68	16941,6	14773,2	6070,4	0,890	0,47	75,9	0,76	26,5	10,625	0,094	17,9
51	1,041	75	13682,7	13697,7	1278,6	2306,9	345,0	16008,0	16,99	75,11	14,99	16008,0	13921,6	6070,4	1,006	0,50	68,5	0,69	26,5	11,697	0,085	16,2
40	0,667	90	16754,3	16772,7	-	2166,9	-	18939,6	13,04	90,00	12,59	18939,6	16821,4	6070,4	0,660	0,40	87,8	0,88	26,0	7,533	0,133	25,2
42	0,724	90	16195,8	16213,6	631,3	2276,8	182,7	18491,1	14,17	90,02	13,07	18491,1	16353,7	6070,4	0,707	0,41	85,0	0,85	26,0	7,902	0,127	24,0
44	0,786	90	15637,4	15654,6	637,6	2386,7	189,0	18042,5	15,38	90,05	14,88	18042,5	15705,1	6070,4	0,778	0,44	88,0	0,88	25,8	9,150	0,109	20,8
46	0,852	90	15078,9	15095,5	644,4	2496,6	195,8	17593,9	16,68	90,07	16,10	17593,9	15153,9	6070,4	0,843	0,46	87,9	0,88	25,0	6,746	0,148	28,2
48	0,923	90	14520,4	14536,4	651,6	2606,4	203,0	17145,3	18,08	90,08	16,99	17145,3	14655,4	6070,4	0,905	0,48	86,3	0,86	25,0	7,532	0,133	25,2
51	1,041	90	13682,7	13697,7	989,2	2771,3	316,3	16472,4	20,39	90,11	18,13	16472,4	13943,9	6070,4	1,003	0,50	83,2	0,83	25,0	7,856	0,127	24,2

Onde :

n : Porosidade (%);

n<sub>r</sub> : Porosidade real (%);

e : Índice de vazios;

e<sub>r</sub> : Índice de vazios real;

S : Porcentagem de saturação esperado (%);

S<sub>final</sub> : Porcentagem de saturação final (%);

S<sub>r</sub> : Porcentagem de saturação real (%);

W<sub>s</sub> : Peso dos sólidos (g);

W<sub>h</sub> : Umidade higroscópica (%);

W<sub>f</sub> : Umidade final esperada (%);

w : Umidade real (%)

W<sub>uh</sub> : Peso dos sólidos úmidos na umidade w<sub>h</sub> (g);

W<sub>uw</sub> : Peso dos sólidos úmidos na umidade w<sub>f</sub> (g);

V<sub>w</sub> : Volume de água (cm<sup>3</sup>);

V<sub>T</sub> : Volume total da amostra (cm<sup>3</sup>)

$\Delta V_w$  : Diferença de volume de água a ser acrescentado (cm<sup>3</sup>);

$\Delta W_{uw}$  : Diferença de peso de material a ser acrescentado (g);

T : Temperatura (°C);

C<sub>ond</sub> M<sub>ed</sub> : Condutividade media (ms);

Resist : Resistividade media (Ohm.m);

Fator F : Fator de formação ( $\rho_s/\rho_w$ ).

## **APÊNDICE A**

ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO DOS MATERIAIS Q E Fe  
PARA A DETERMINAÇÃO DA QUEDA DE VOLTAGEM

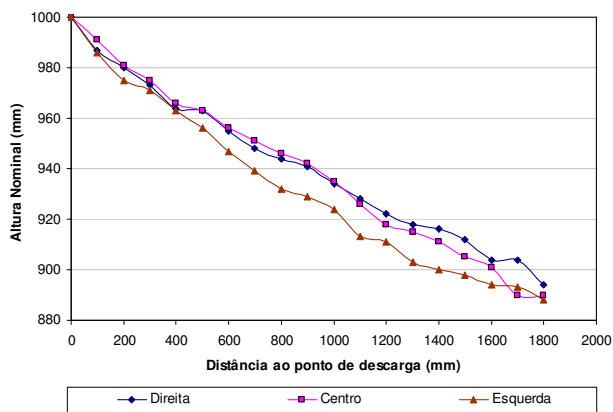




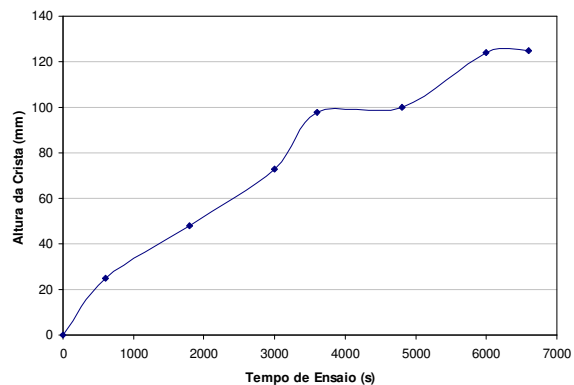


## **APÊNDICE B**

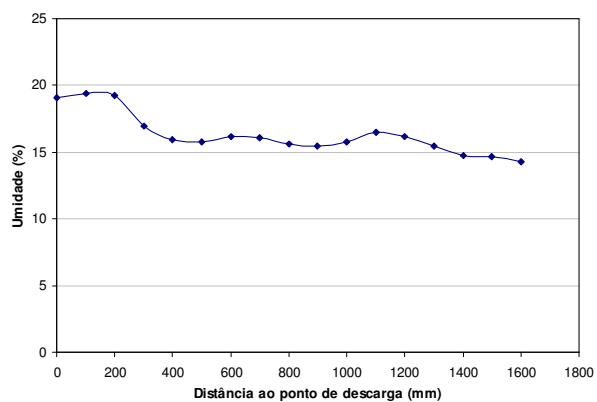
RESUMO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SIMULAÇÃO DE  
DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA NO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO



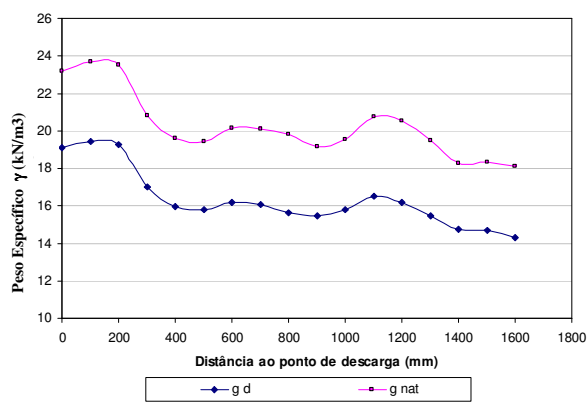
(a) Geometria final da praia



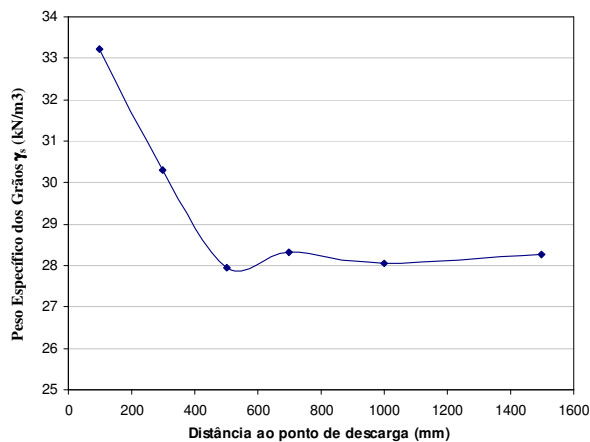
(b) Evolução da altura da crista



(c) Umidade ao longo da praia

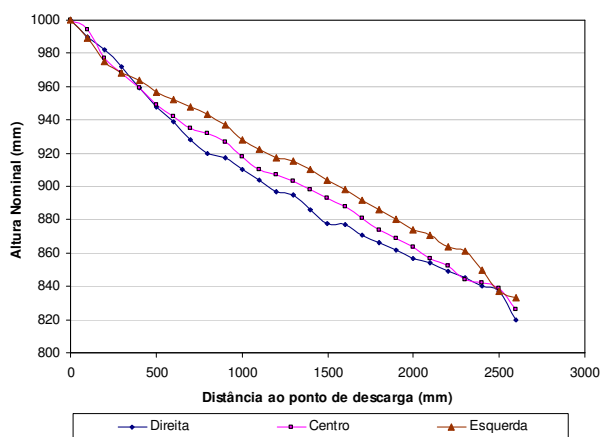


(d) Peso específico ao longo da praia

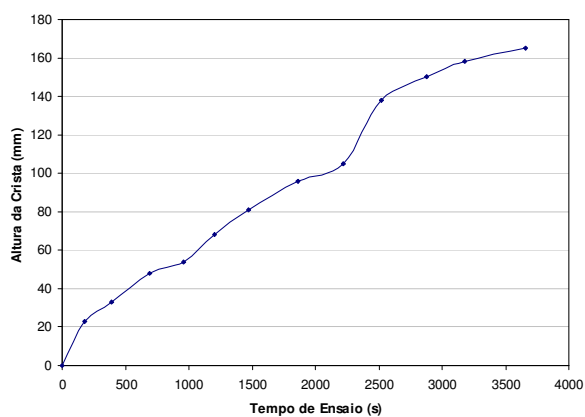


(e) Variação do peso específico dos grãos

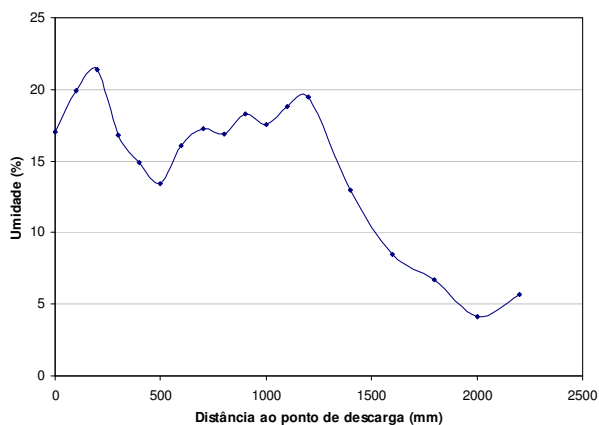
Figura B.1. Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C10Q10



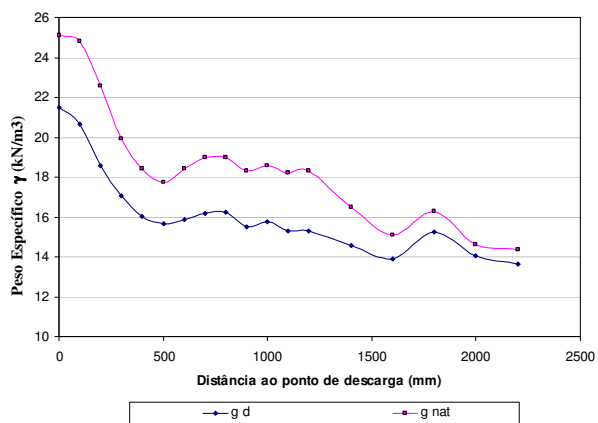
(a) Geometria final da praia



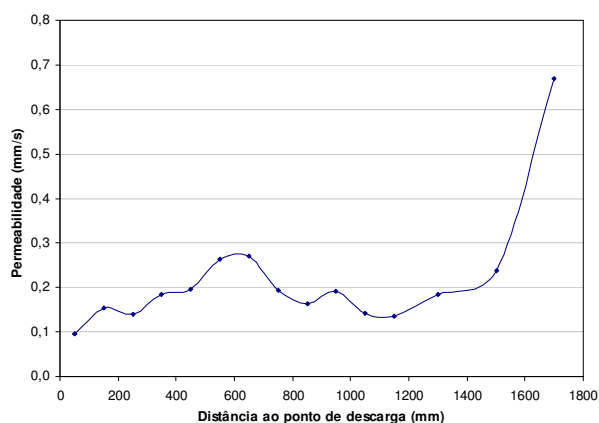
(b) Evolução da altura da crista



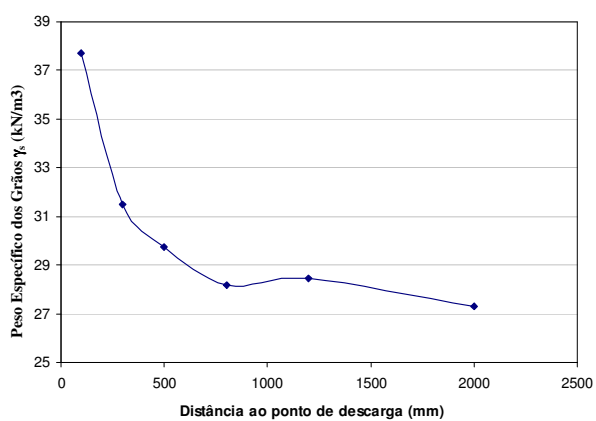
(c) Umidade ao longo da praia



(d) Peso específico ao longo da praia

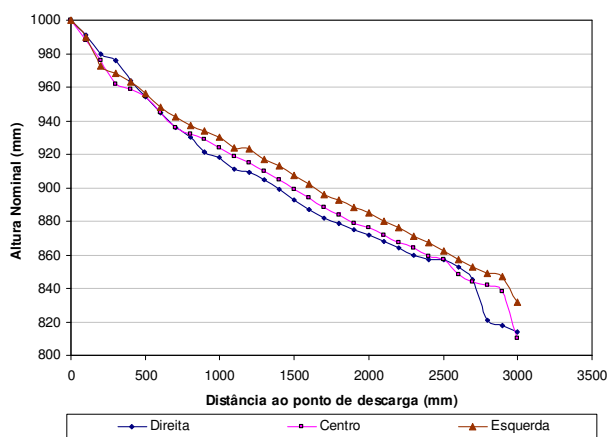


(e) Perfil de permeabilidade ao longo da praia

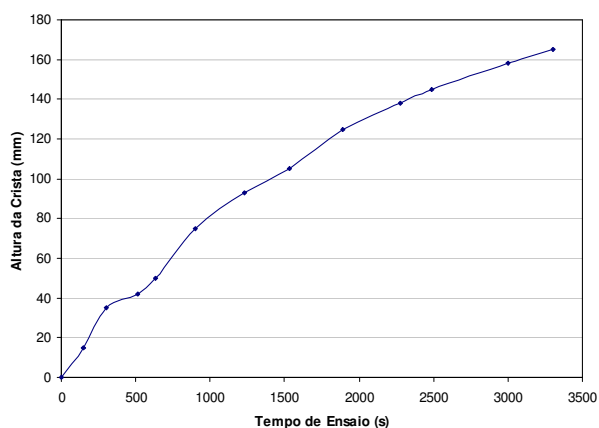


(f) Variação do peso específico dos grãos

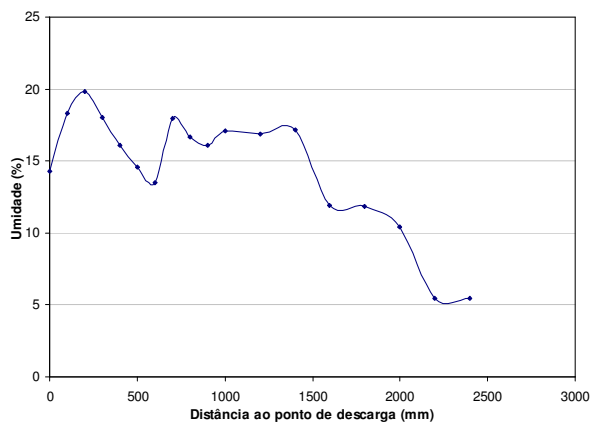
Figura B.2. Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C10Q15



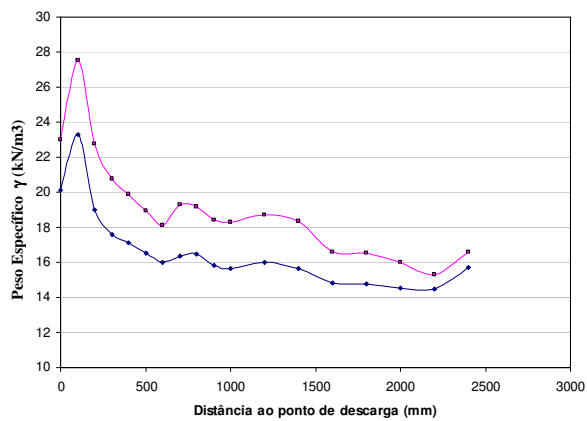
(a) Geometria final da praia



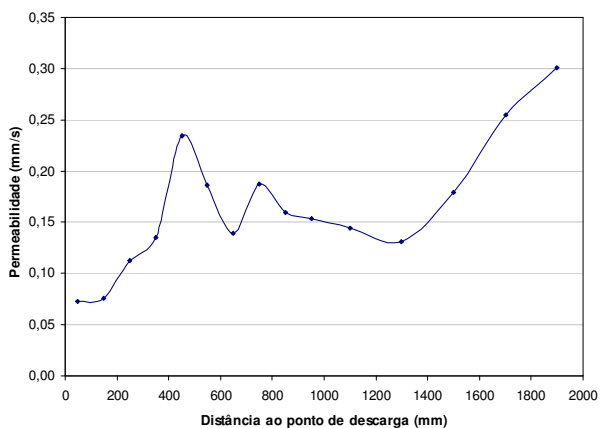
(b) Evolução da altura da crista



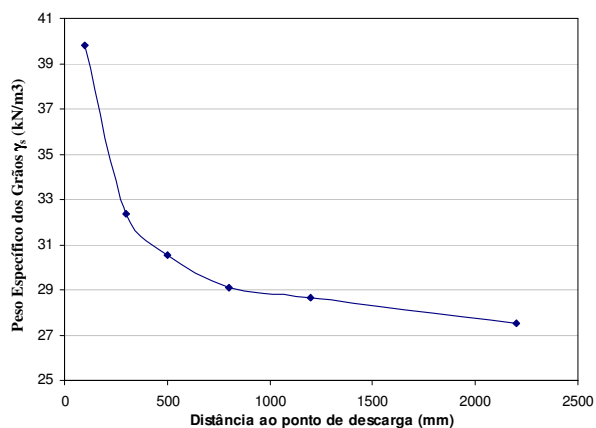
(c) Umidade ao longo da praia



(d) Peso específico ao longo da praia

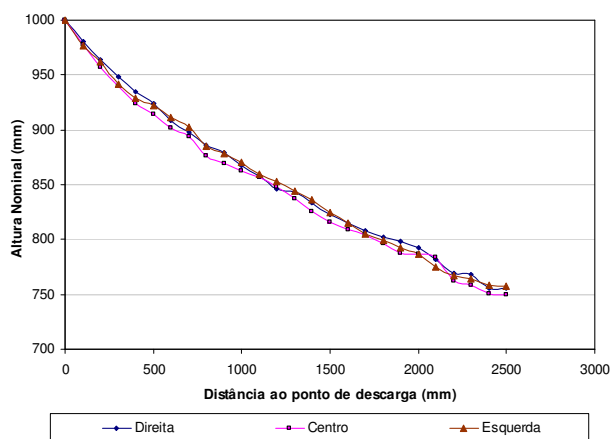


(e) Perfil de permeabilidade ao longo da praia

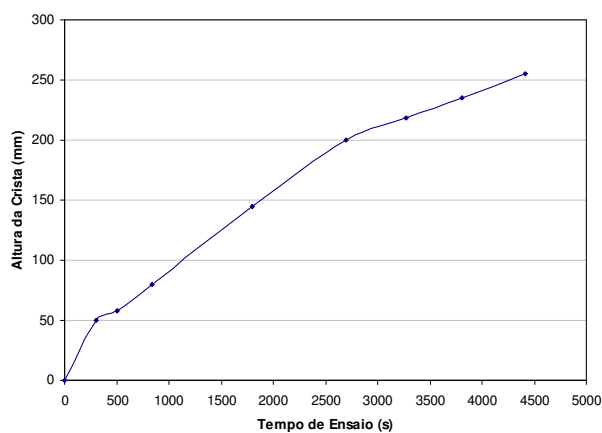


(f) Variação do peso específico dos grãos

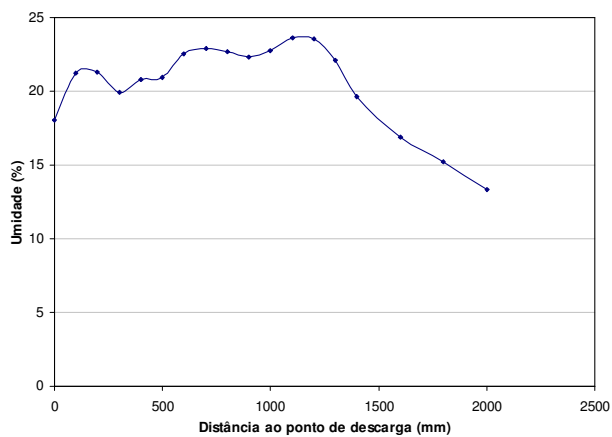
Figura B.3. Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C10Q20



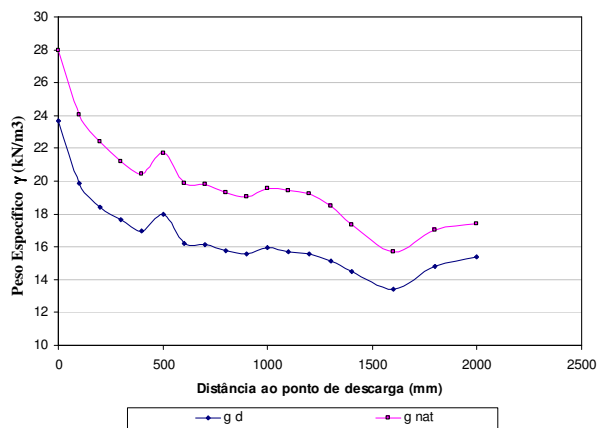
(a) Geometria final da praia



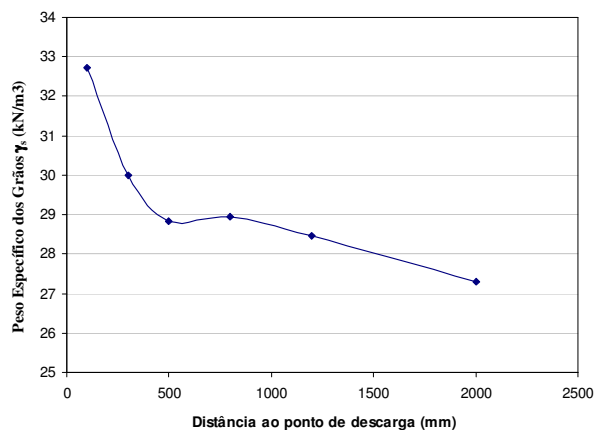
(b) Evolução da altura da crista



(c) Umidade ao longo da praia

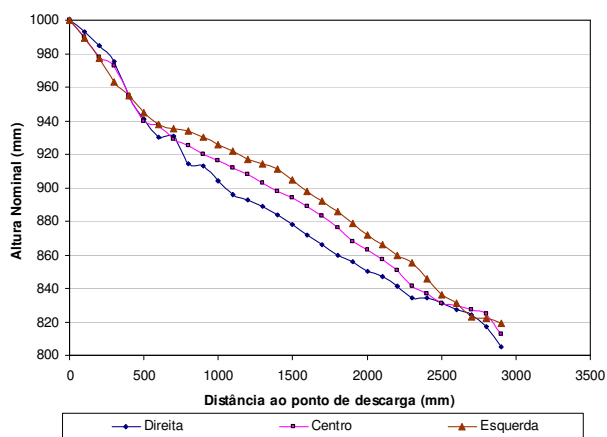


(d) Peso específico ao longo da praia

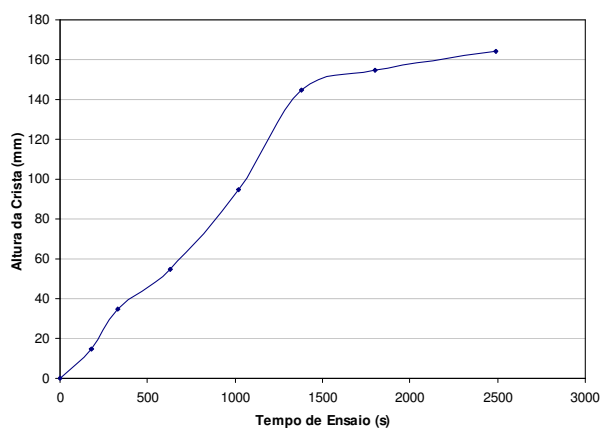


(e) Variação do peso específico dos grãos

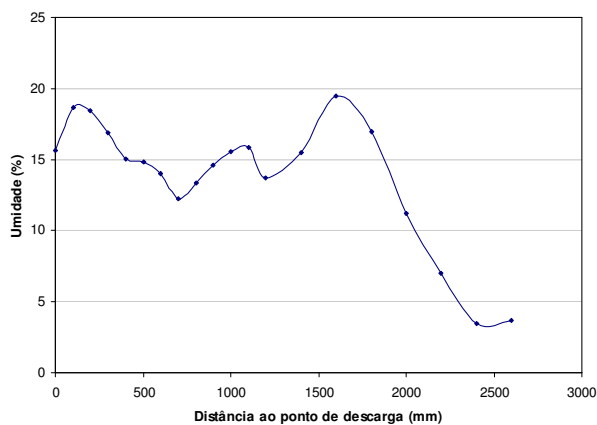
Figura B.4. Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C15Q10



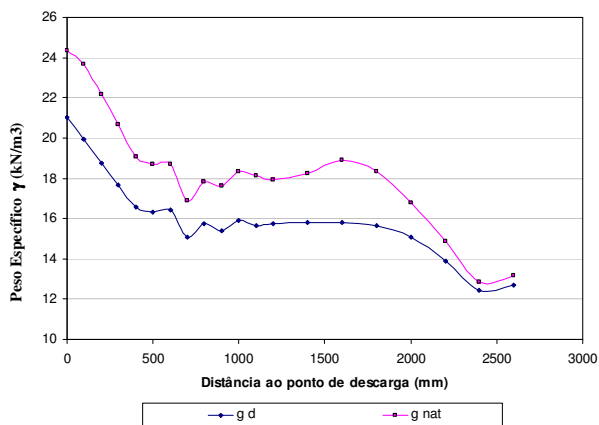
(a) Geometria final da praia



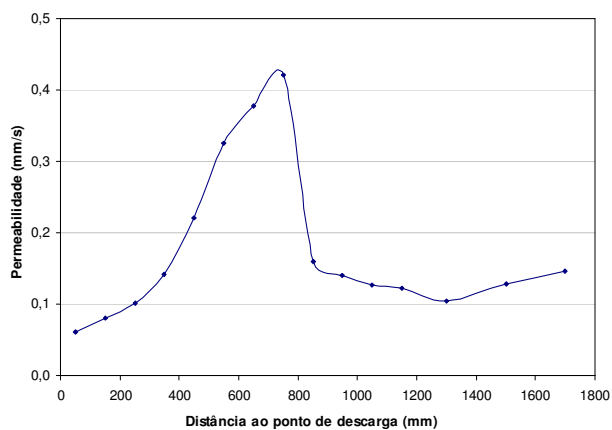
(b) Evolução da altura da crista



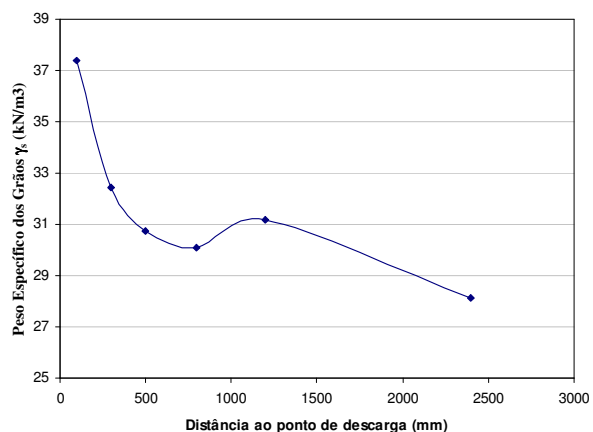
(c) Umidade ao longo da praia



(d) Peso específico ao longo da praia



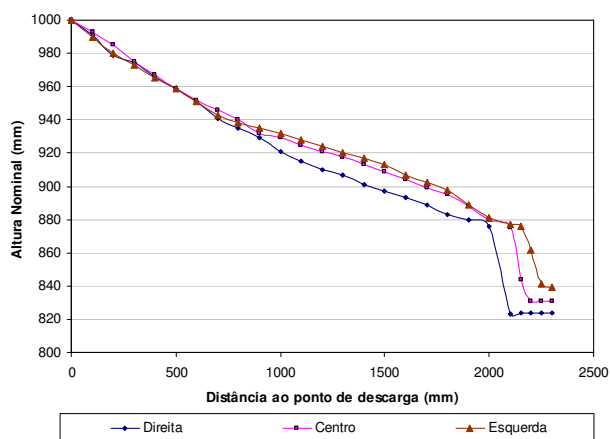
(e) Perfil de permeabilidade ao longo da praia



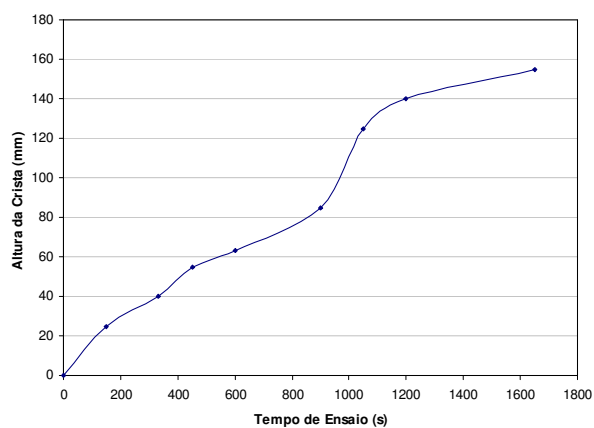
(f) Variação do peso específico dos grãos

Figura B.5. Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C15Q15

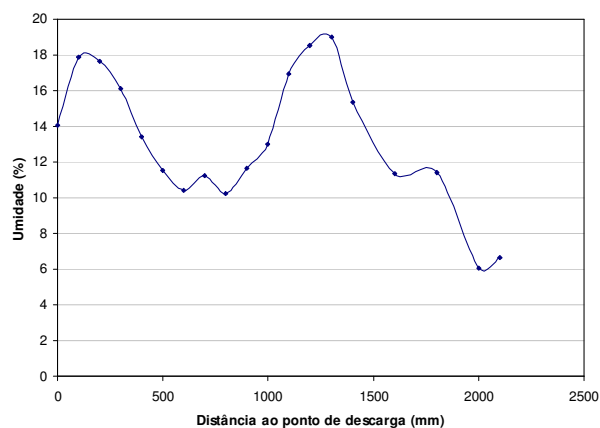




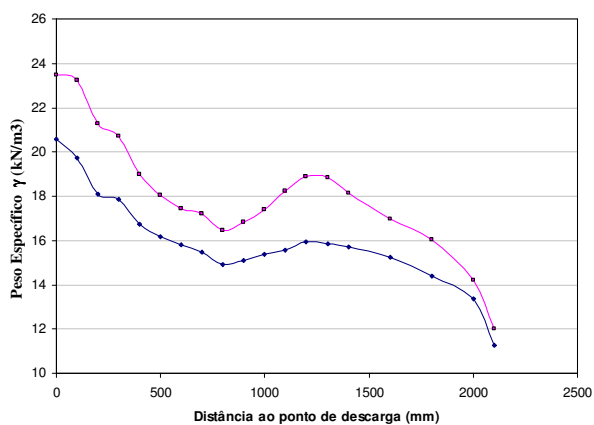
(a) Geometria final da praia



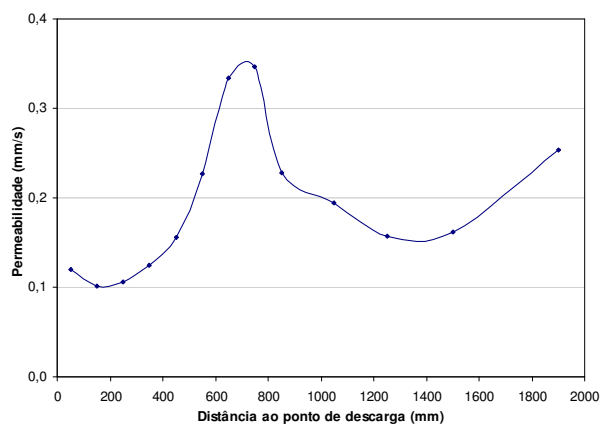
(b) Evolução da altura da crista



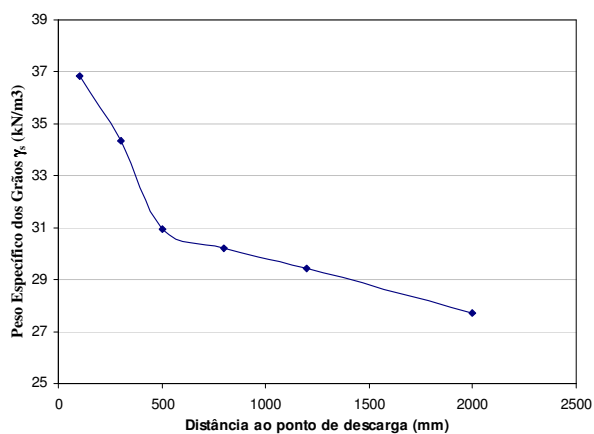
(c) Umidade ao longo da praia



(d) Peso específico ao longo da praia

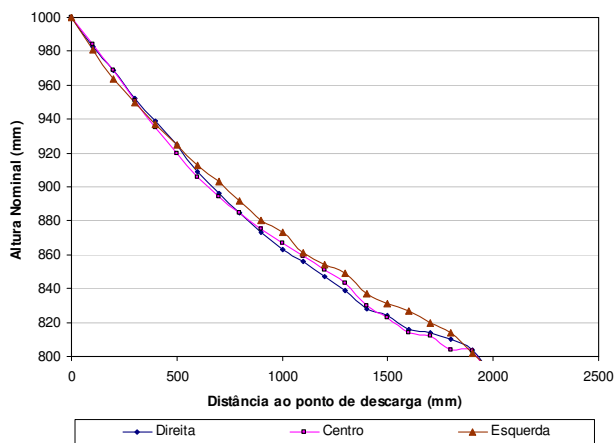


(e) Perfil de permeabilidade ao longo da praia

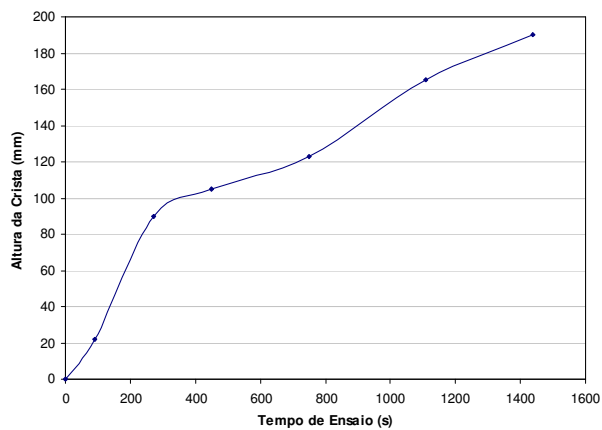


(f) Variação do peso específico dos grãos

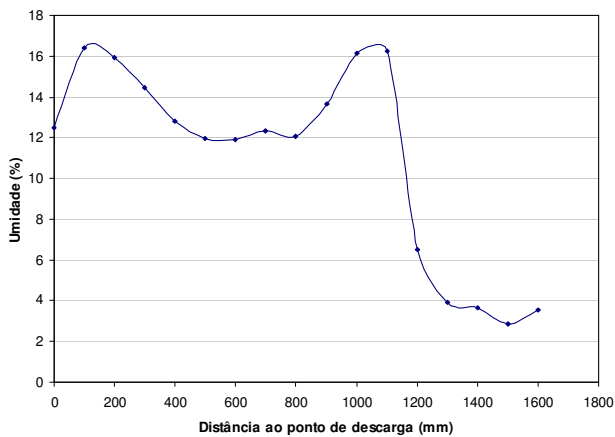
Figura B.6. Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C15Q20



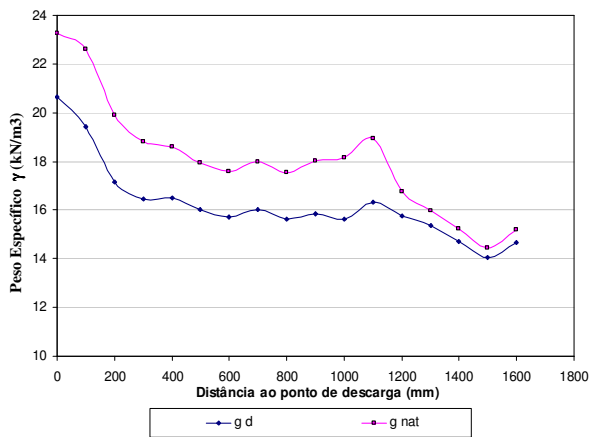
(a) Geometria final da praia



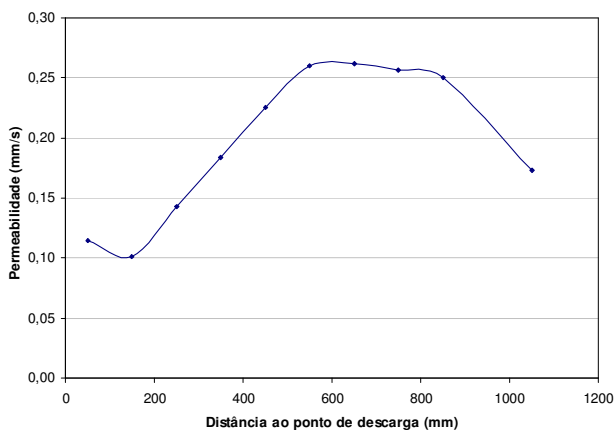
(b) Evolução da altura da crista



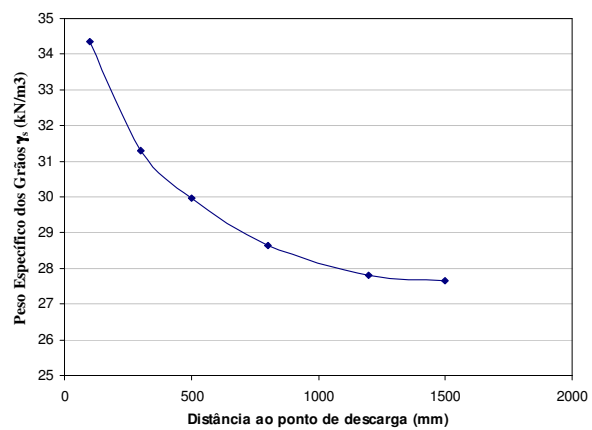
(c) Umidade ao longo da praia



(d) Peso específico ao longo da praia

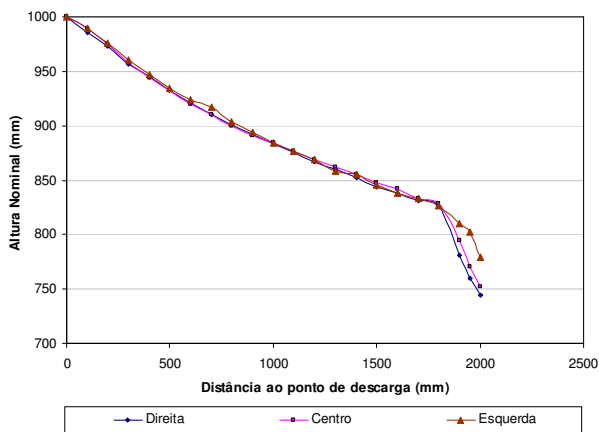


(e) Perfil de permeabilidade ao longo da praia

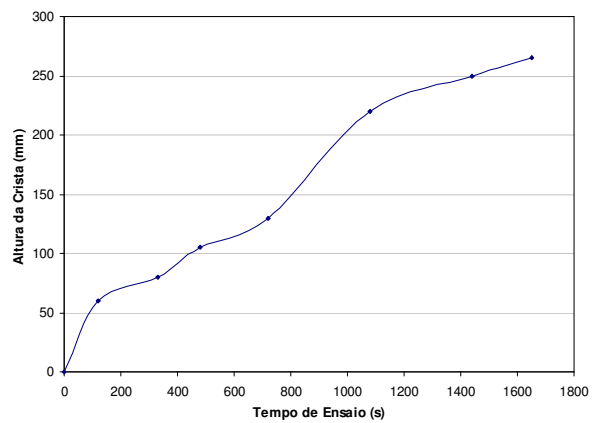


(f) Variação do peso específico dos grãos

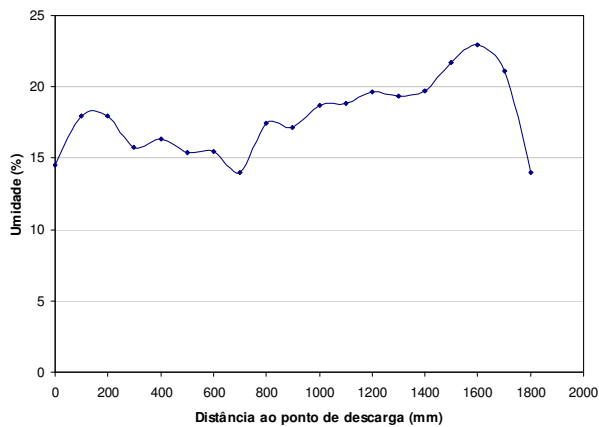
Figura B.7. Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C25Q10



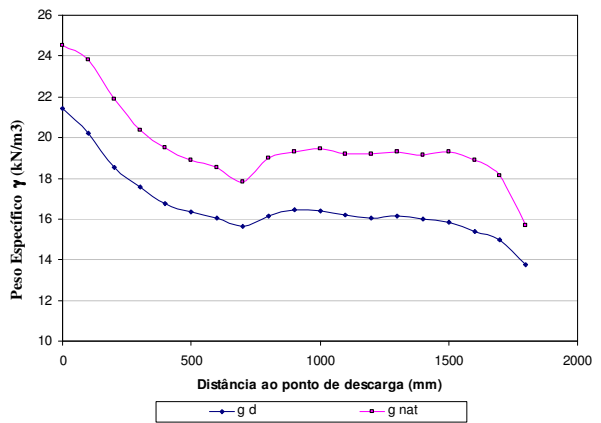
(a) Geometria final da praia



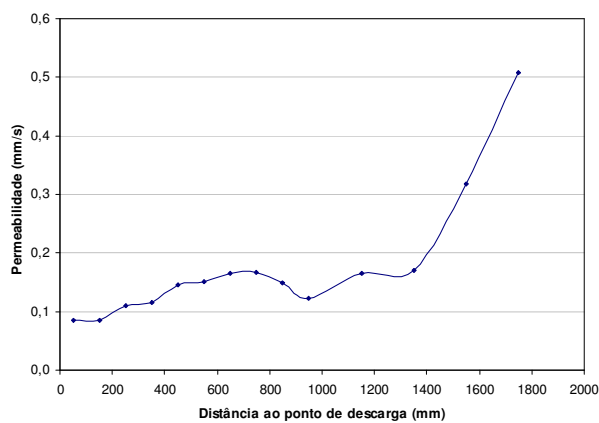
(b) Evolução da altura da crista



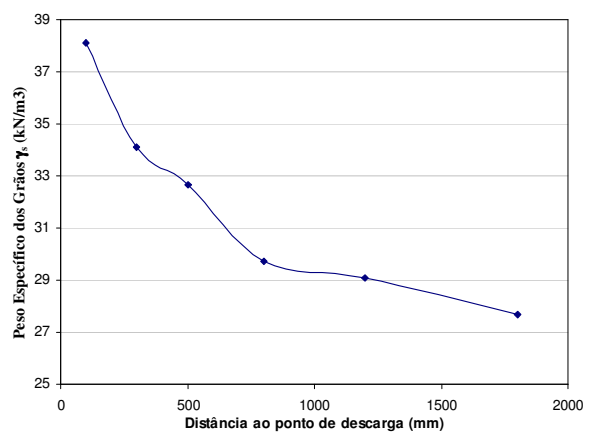
(c) Umidade ao longo da praia



(d) Peso específico ao longo da praia

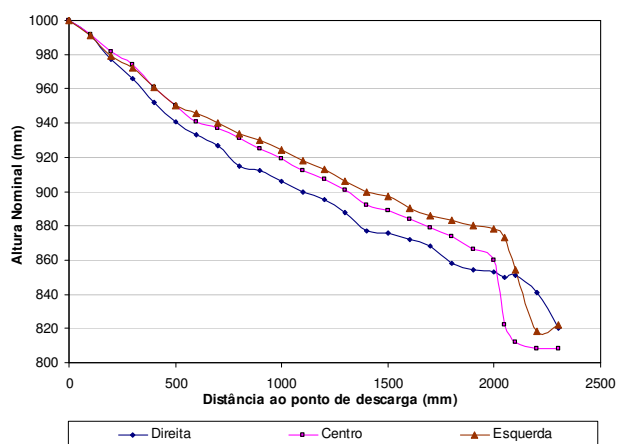


(e) Perfil de permeabilidade ao longo da praia

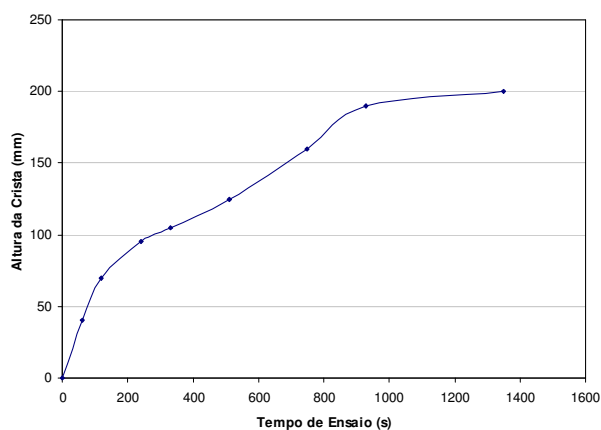


(f) Variação do peso específico dos grãos

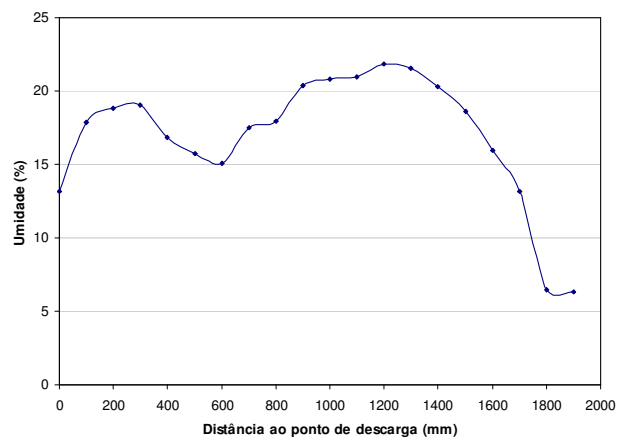
Figura B.8. Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C25Q15



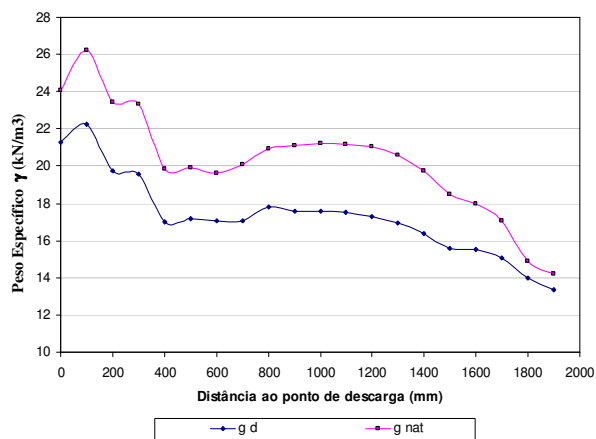
(a) Geometria final da praia



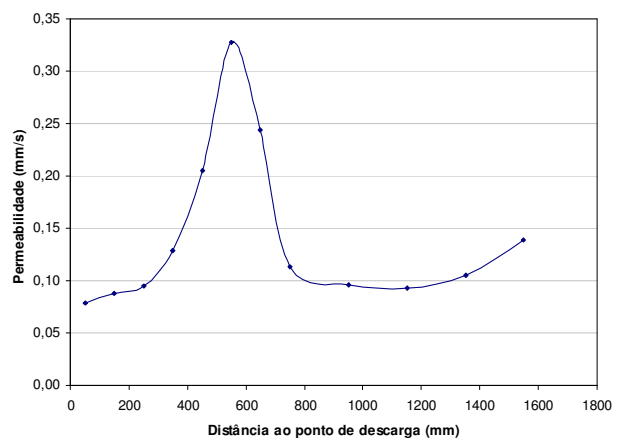
(b) Evolução da altura da crista



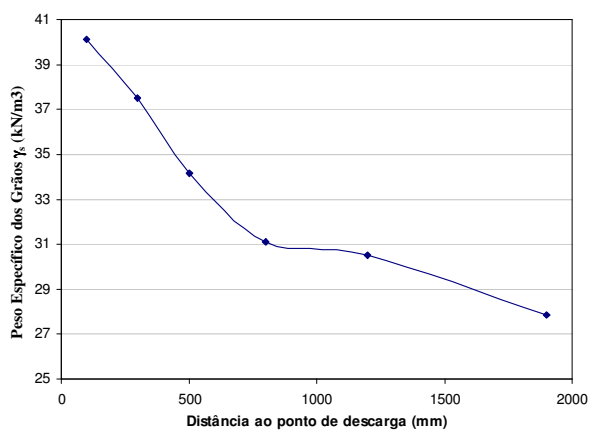
(c) Umidade ao longo da praia



(d) Peso específico ao longo da praia



(e) Perfil de permeabilidade ao longo da praia

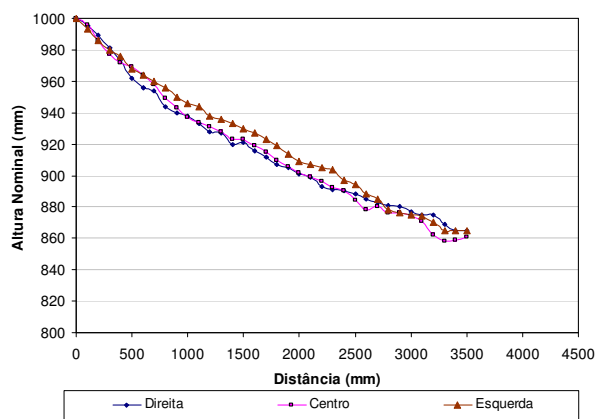


(f) Variação do peso específico dos grãos

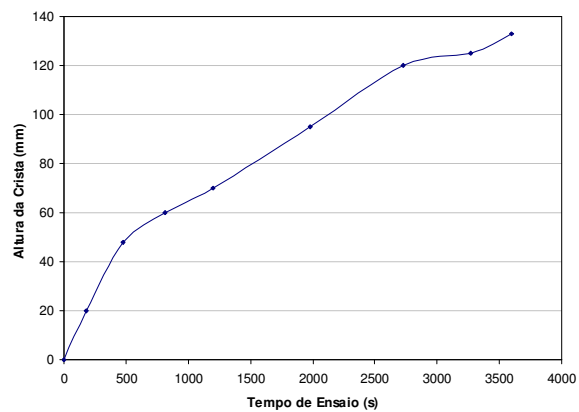
Figura B.9. Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C25Q20

## **APÊNDICE C**

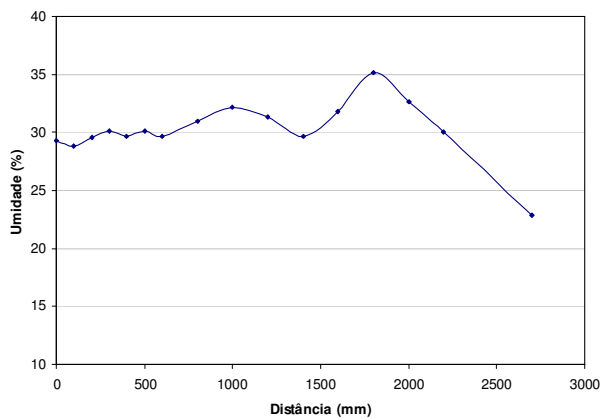
**RESUMO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SIMULAÇÃO DE  
DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA NO REJEITO DE MINÉRIO DE OURO**



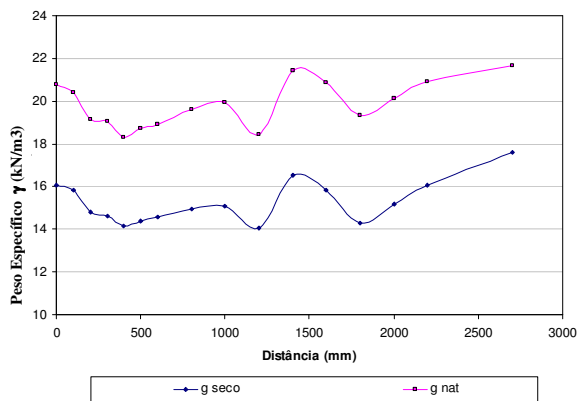
(a) Geometria final da praia



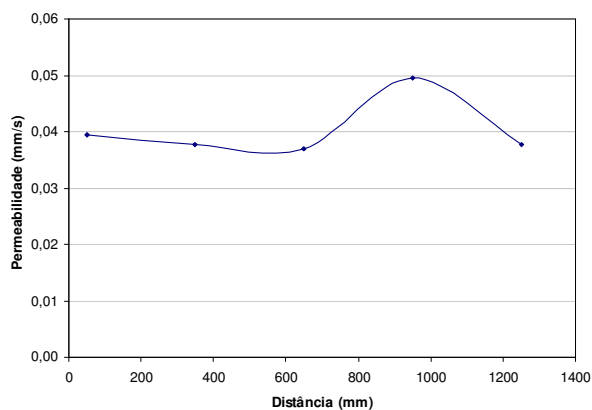
(b) Evolução da altura da crista



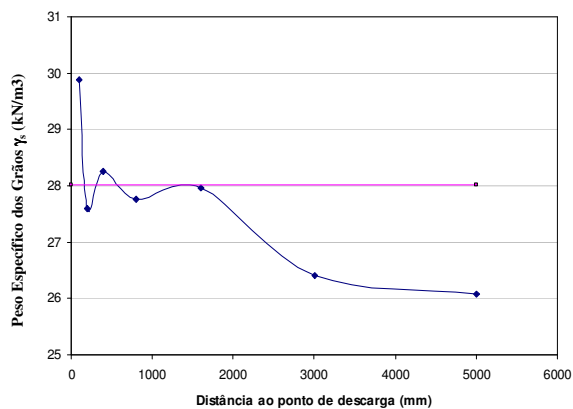
(c) Umidade ao longo da praia



(d) Peso específico ao longo da praia

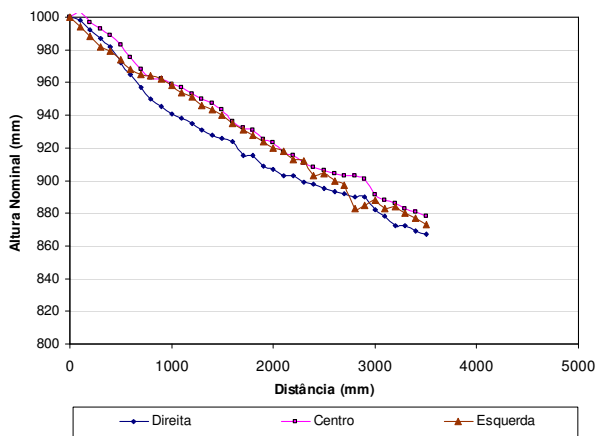


(e) Perfil de permeabilidade ao longo da praia

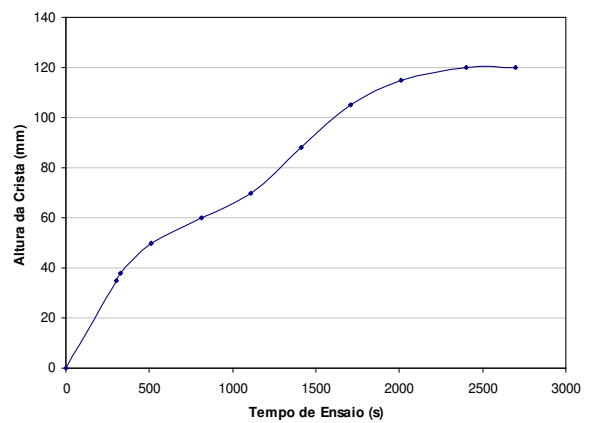


(f) Variação do peso específico dos grãos

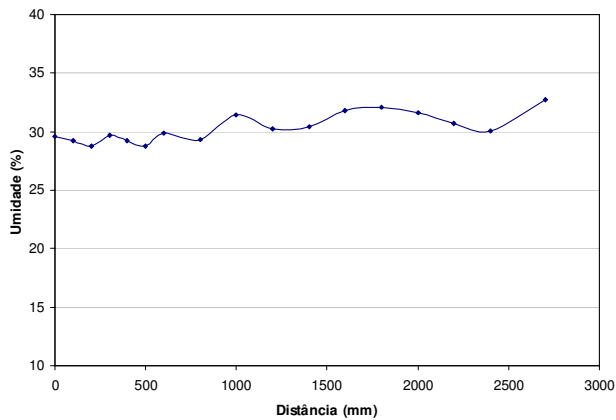
Figura C.1. Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C10Q10



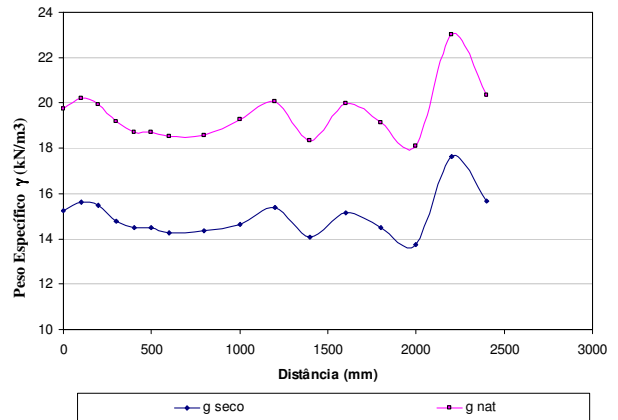
(a) Geometria final da praia



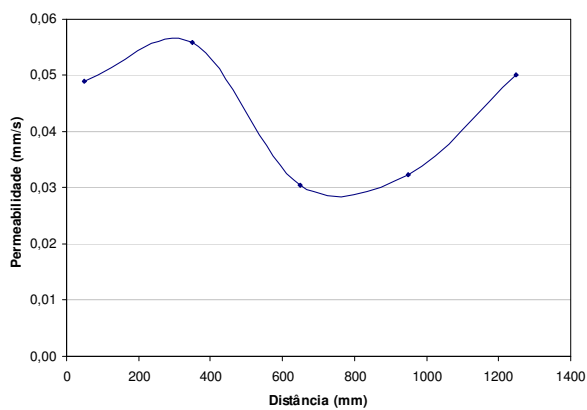
(b) Evolução da altura da crista



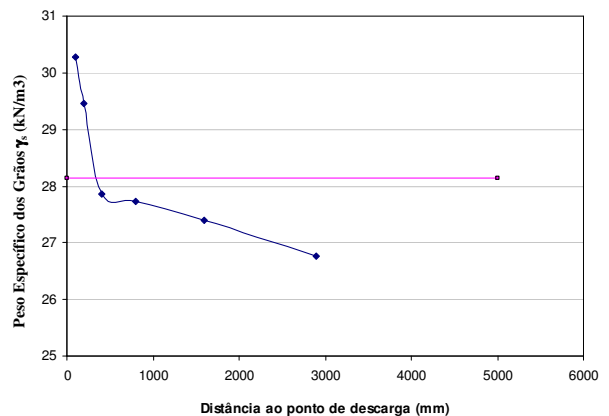
(c) Umidade ao longo da praia



(d) Peso específico ao longo da praia

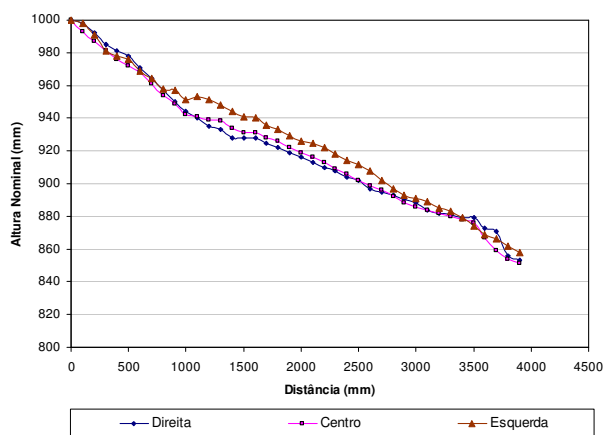


(e) Perfil de permeabilidade ao longo da praia

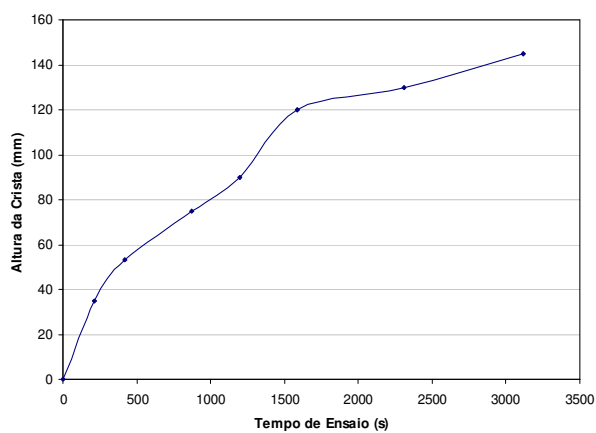


(f) Variação do peso específico dos grãos

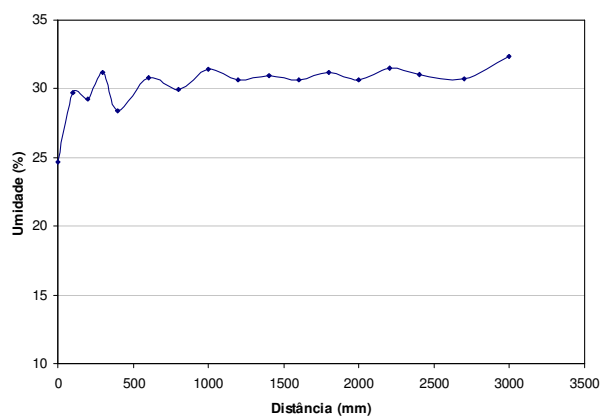
Figura C.2. Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C10Q15



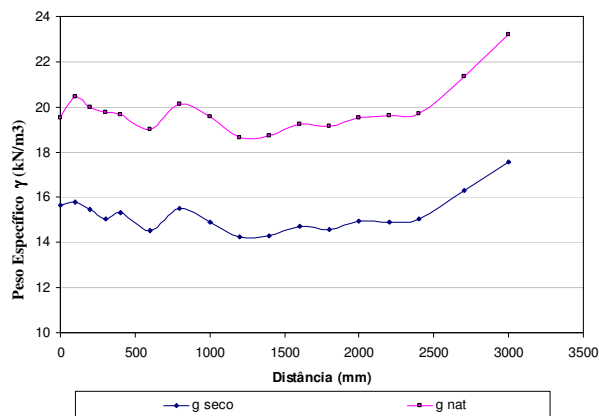
(a) Geometria final da praia



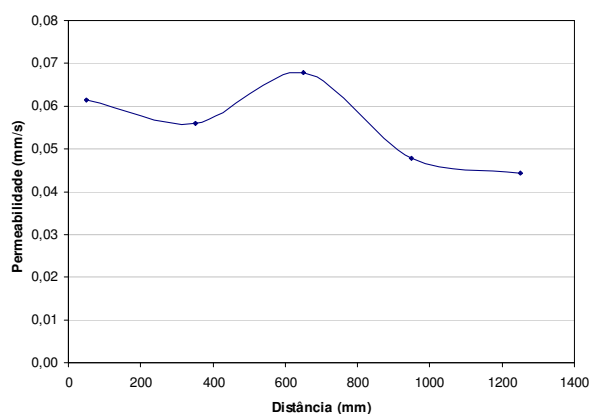
(b) Evolução da altura da crista



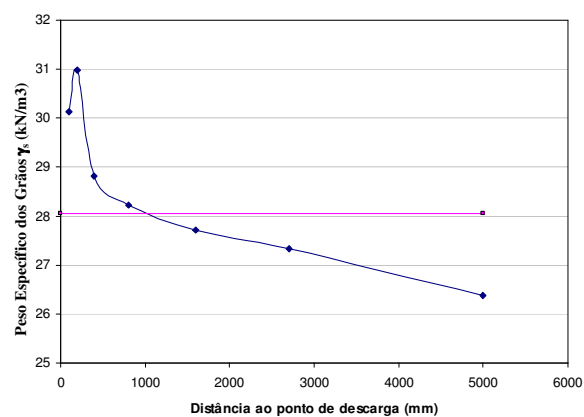
(c) Umidade ao longo da praia



(d) Peso específico ao longo da praia



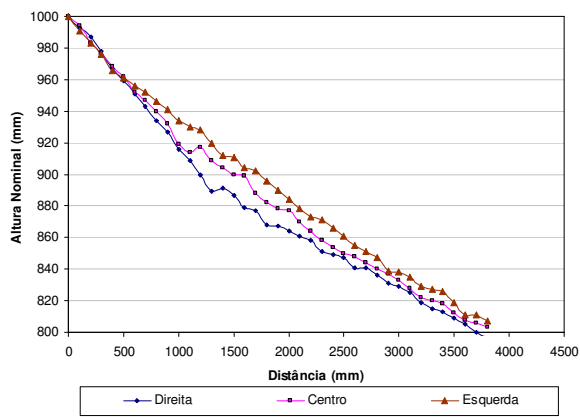
(e) Perfil de permeabilidade ao longo da praia



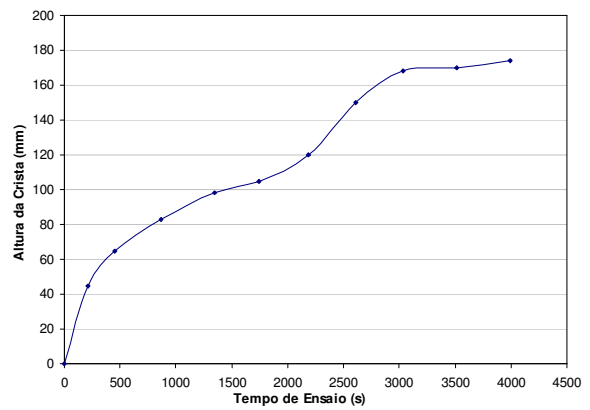
(f) Variação do peso específico dos grãos

Figura C.3. Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C10Q20

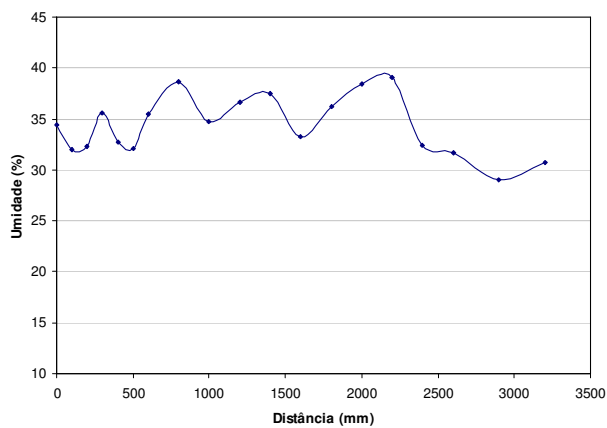




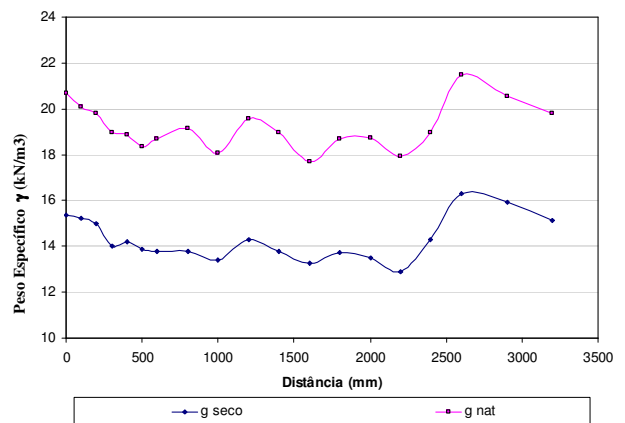
(a) Geometria final da praia



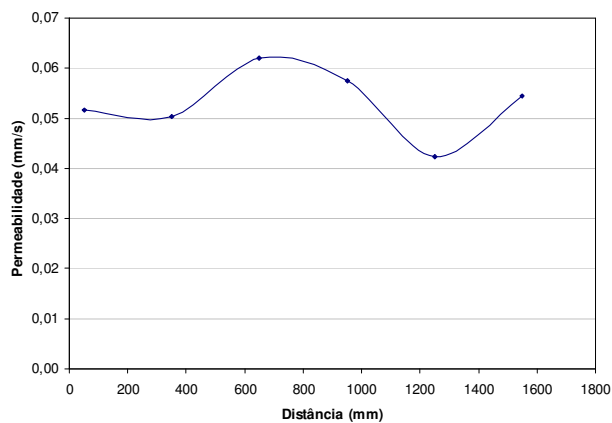
(b) Evolução da altura da crista



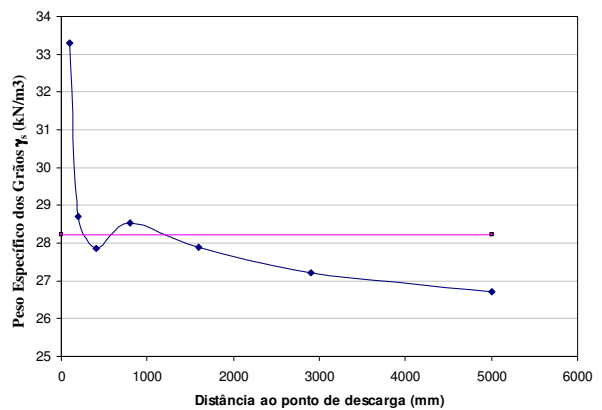
(c) Umidade ao longo da praia



(d) Peso específico ao longo da praia

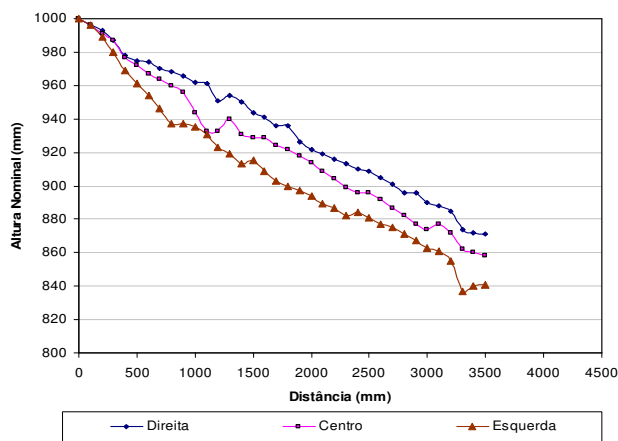


(e) Perfil de permeabilidade ao longo da praia

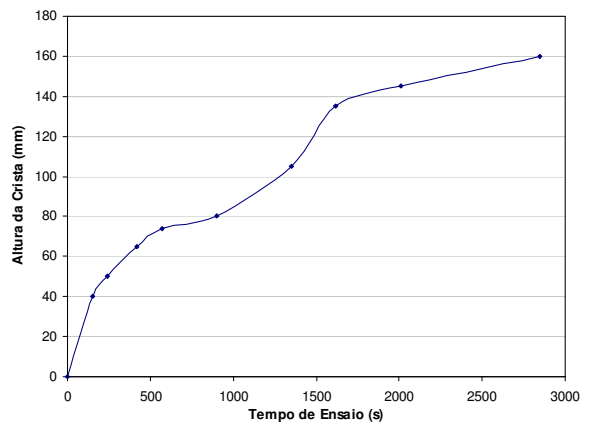


(f) Variação do peso específico dos grãos

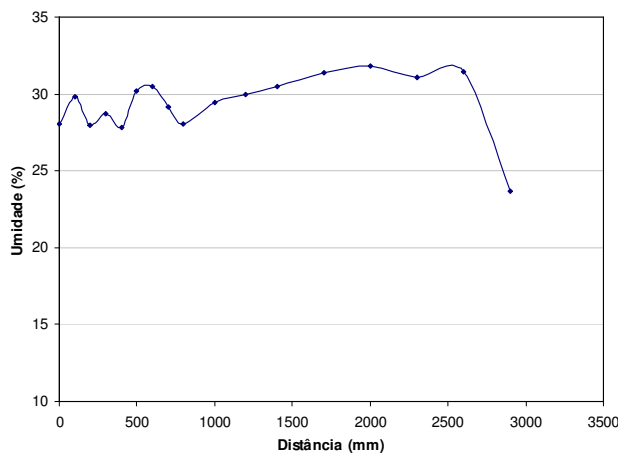
Figura C.4. Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C15Q10



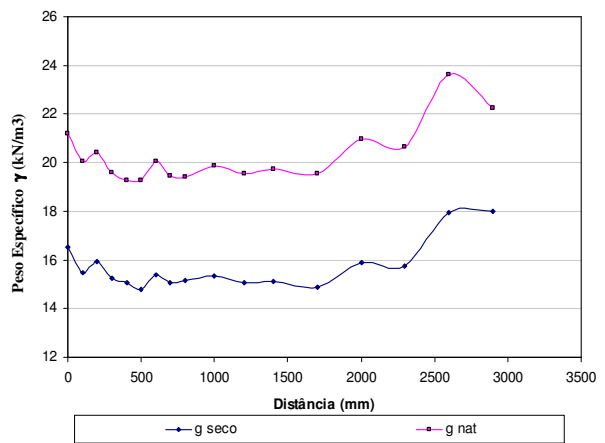
(a) Geometria final da praia



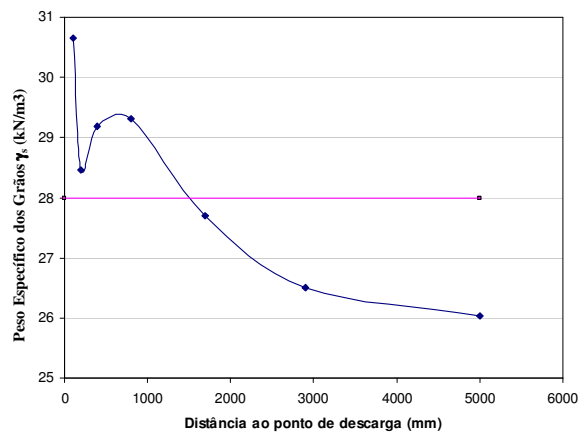
(b) Evolução da altura da crista



(c) Umidade ao longo da praia após 24h

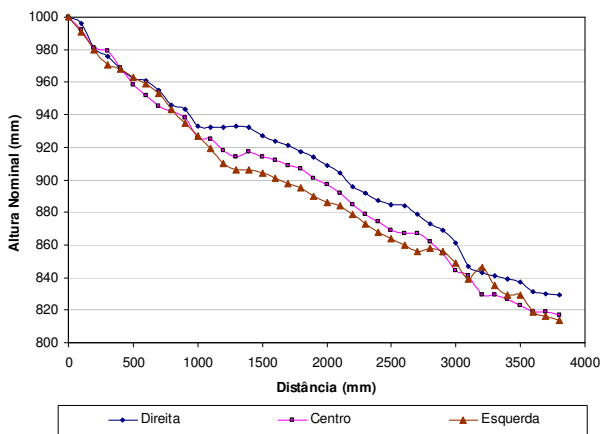


(d) Peso específico ao longo da praia

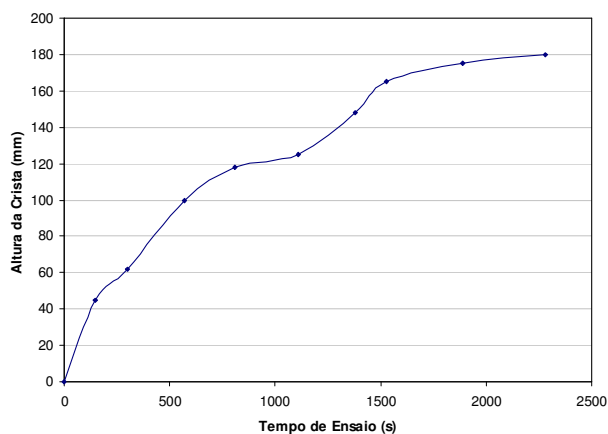


(e) Variação do peso específico dos grãos

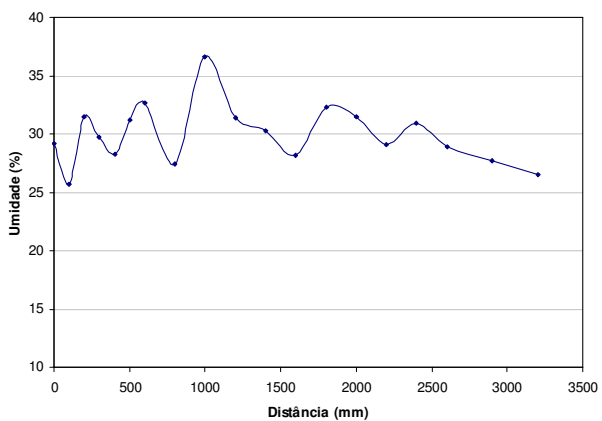
Figura C.5. Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C15Q15



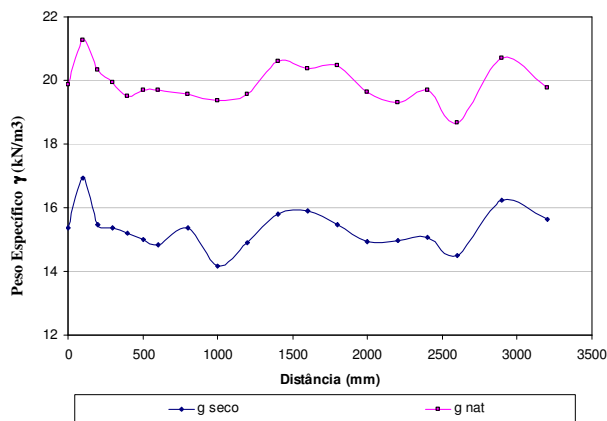
(a) Geometria final da praia



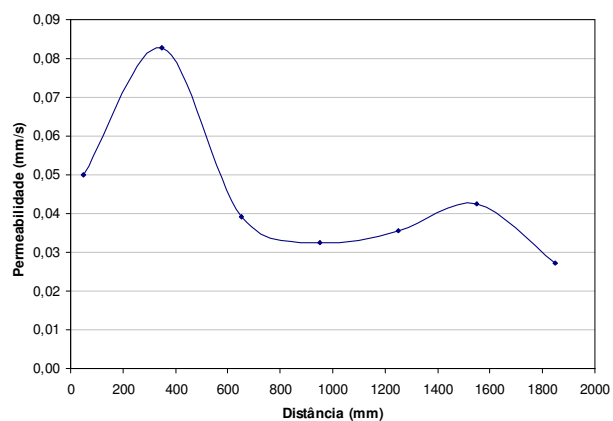
(b) Evolução da altura da crista



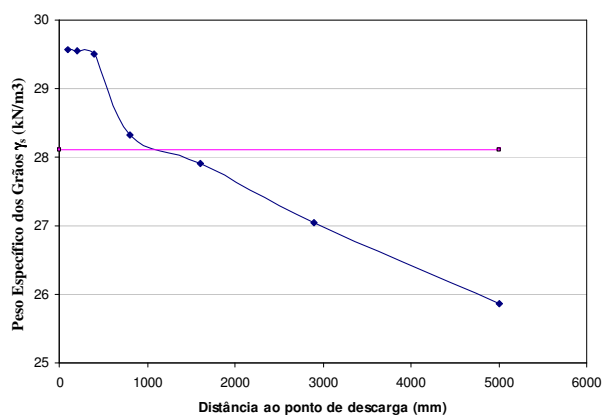
(c) Umidade ao longo da praia



(d) Peso específico ao longo da praia

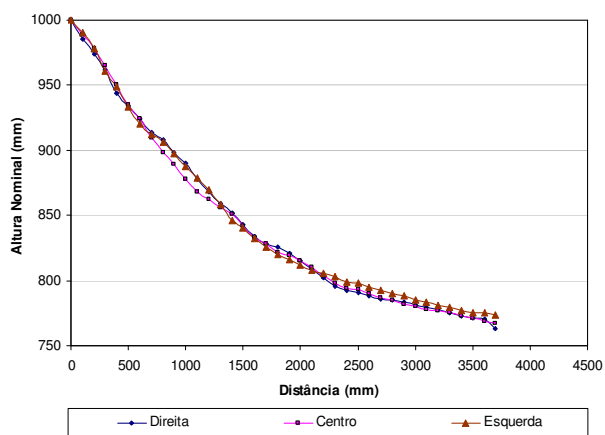


(e) Perfil de permeabilidade ao longo da praia

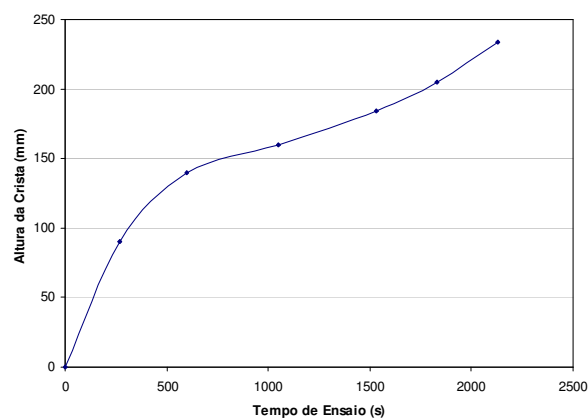


(f) Variação do peso específico dos grãos

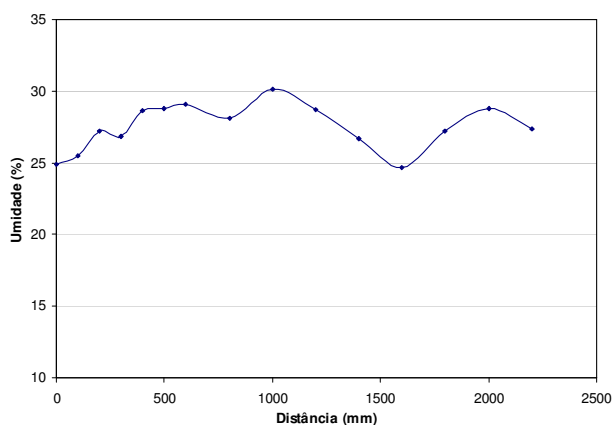
Figura C.6. Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C15Q20



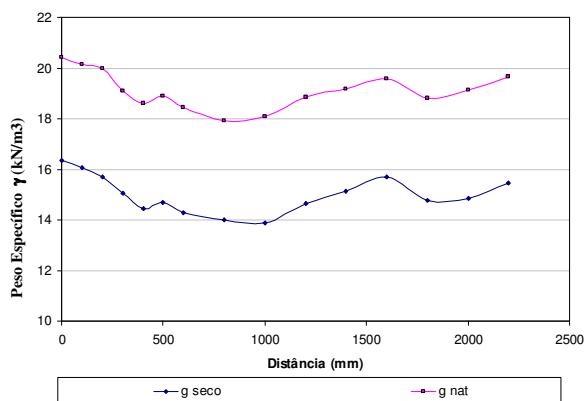
(a) Geometria final da praia



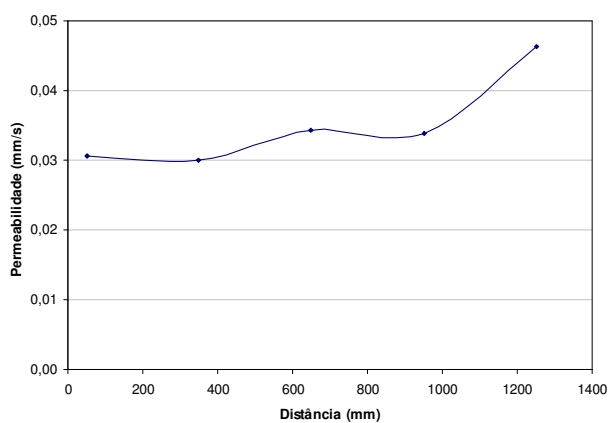
(b) Evolução da altura da crista



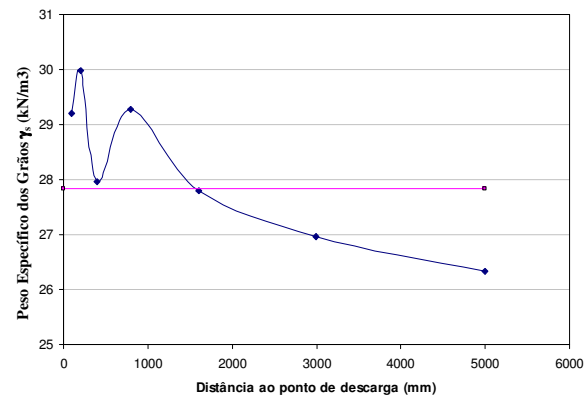
(c) Umidade ao longo da praia



(d) Peso específico ao longo da praia

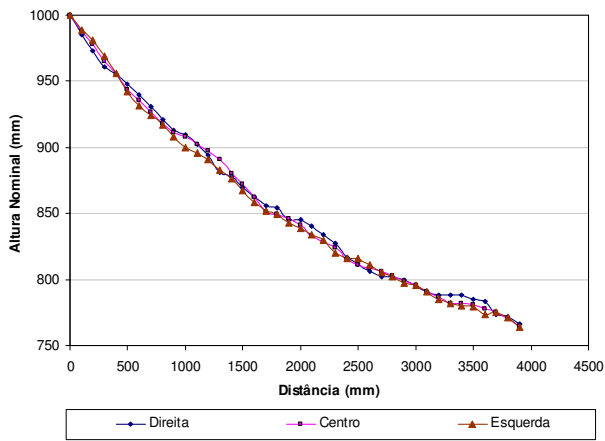


(e) Perfil de permeabilidade ao longo da praia

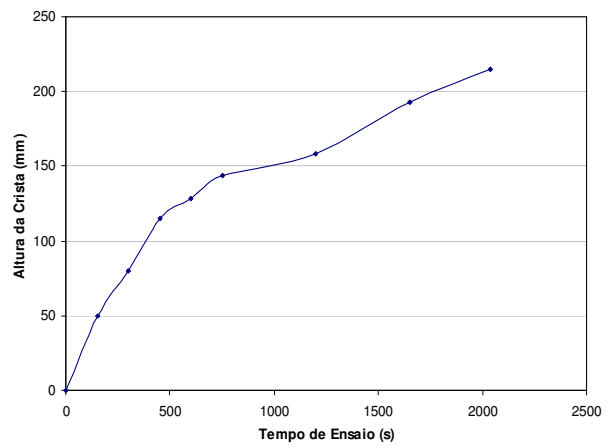


(f) Variação do peso específico dos grãos

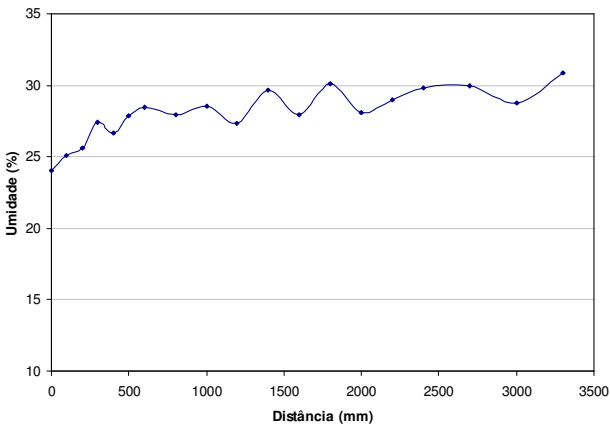
Figura C.7. Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C20Q10



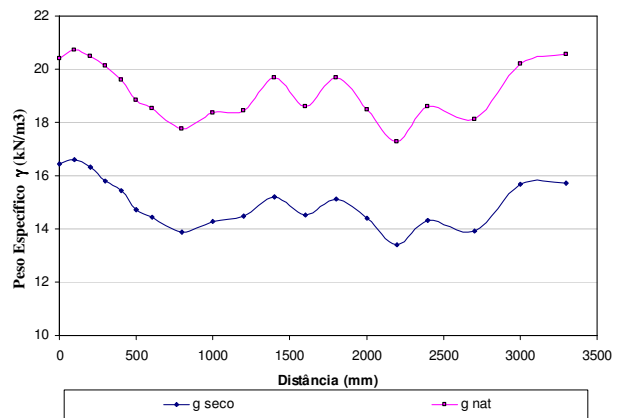
(a) Geometria final da praia



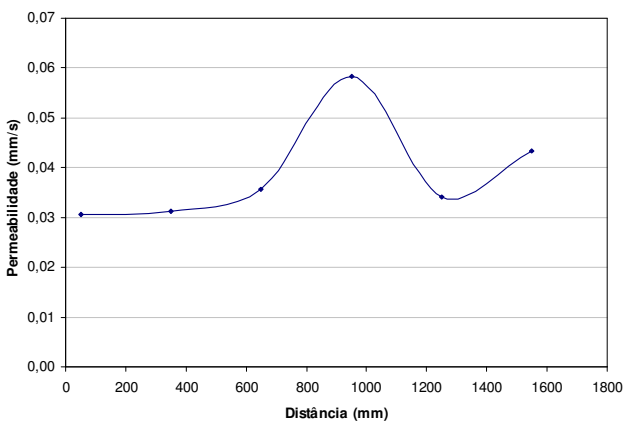
(b) Evolução da altura da crista



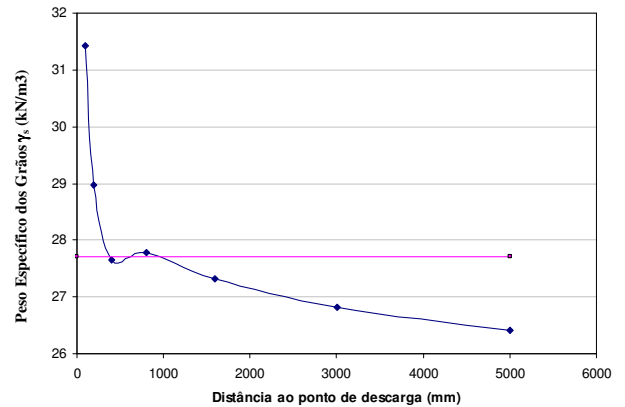
(c) Umidade ao longo da praia



(d) Peso específico ao longo da praia

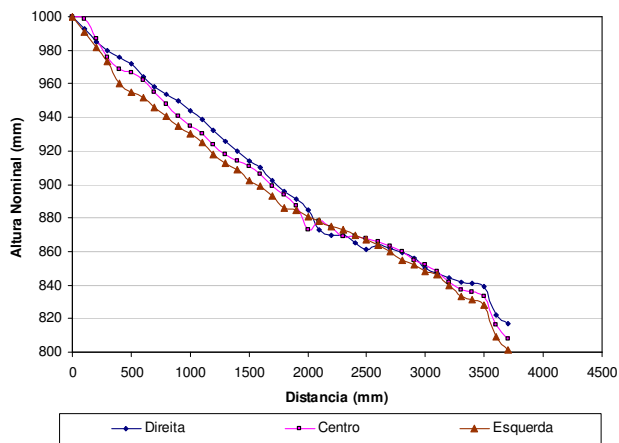


(e) Perfil de permeabilidade ao longo da praia

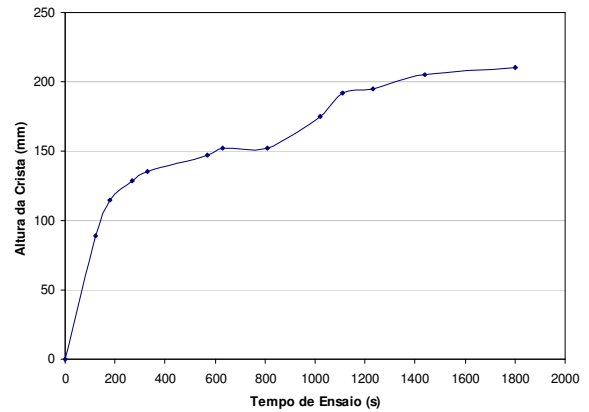


(f) Variação do peso específico dos grãos

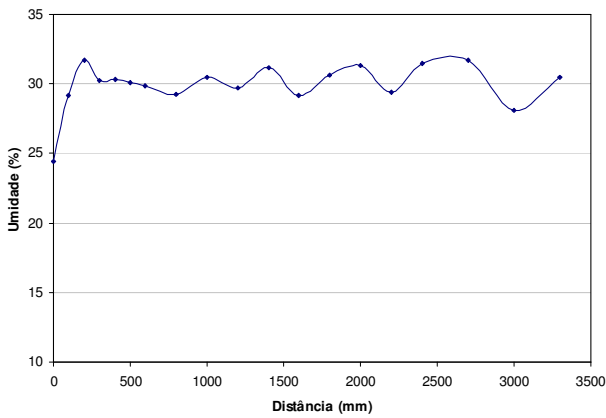
Figura C.8. Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C20Q15



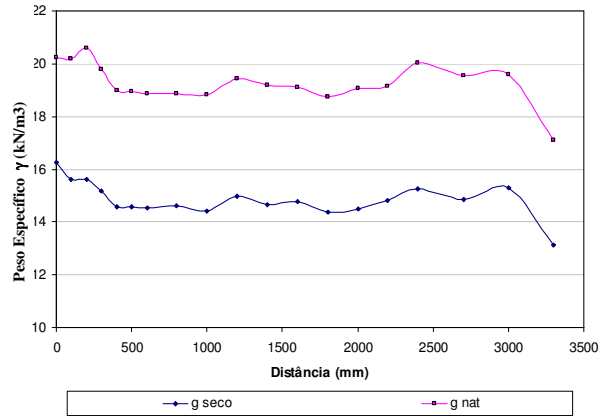
(a) Geometria final da praia



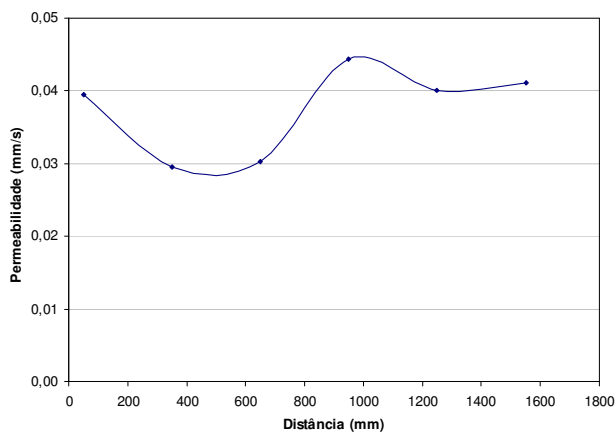
(b) Evolução da altura da crista



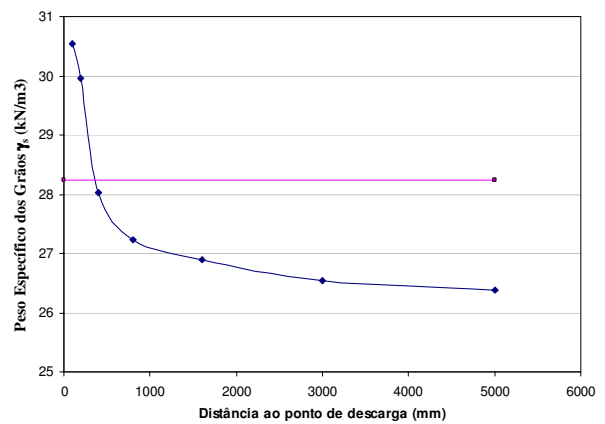
(c) Umidade ao longo da praia



(d) Peso específico ao longo da praia



(e) Perfil de permeabilidade ao longo da praia

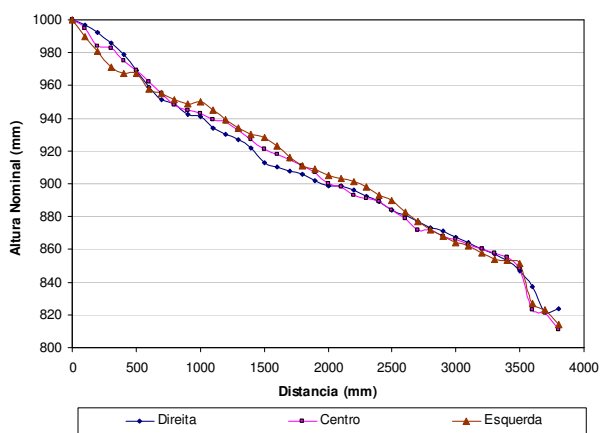


(f) Variação do peso específico dos grãos

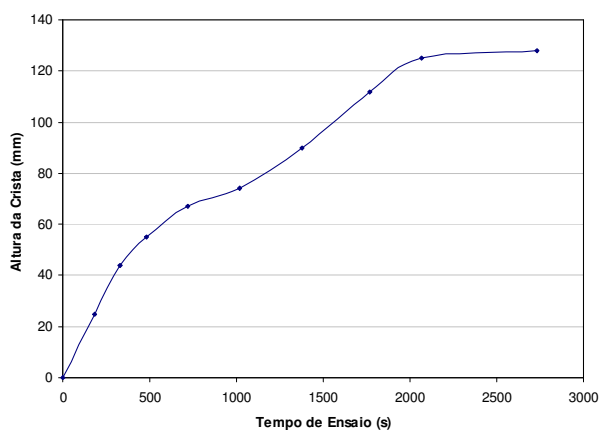
Figura C.9. Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C20Q20

## **APÊNDICE D**

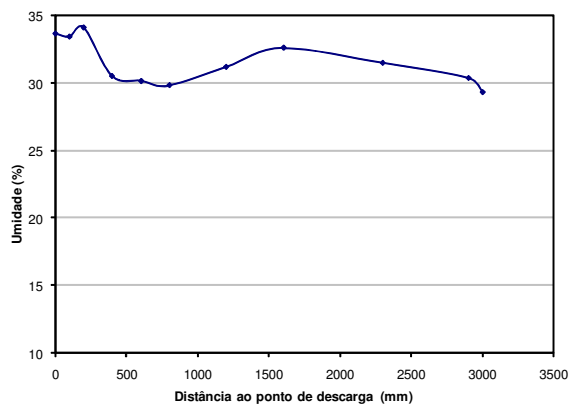
RESUMO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SIMULAÇÃO DE  
DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA NO REJEITO DE MINÉRIO DE OURO  
CICLONADO (*underflow*)



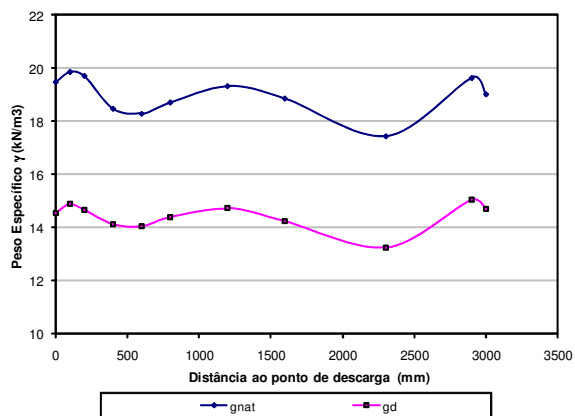
(a) Geometria final da praia



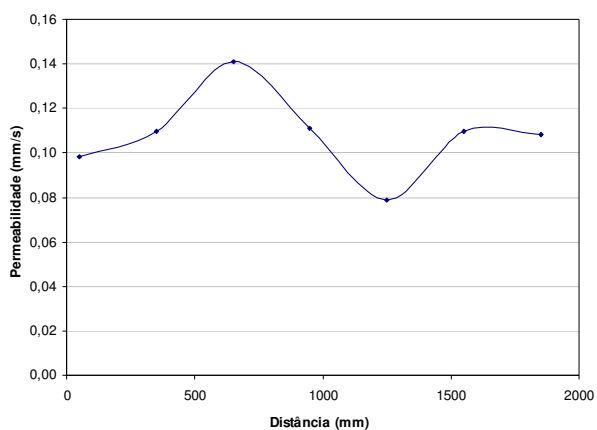
(b) Evolução da altura da crista



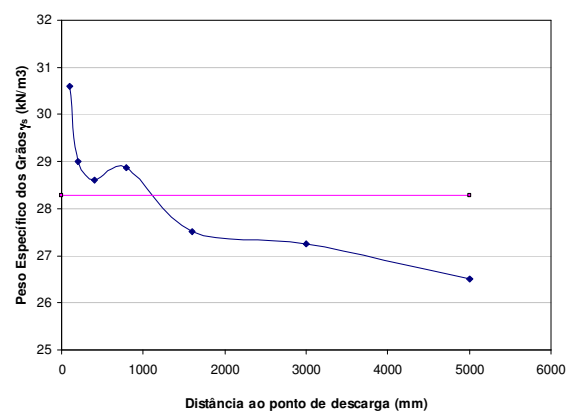
(c) Umidade ao longo da praia



(d) Peso específico ao longo da praia



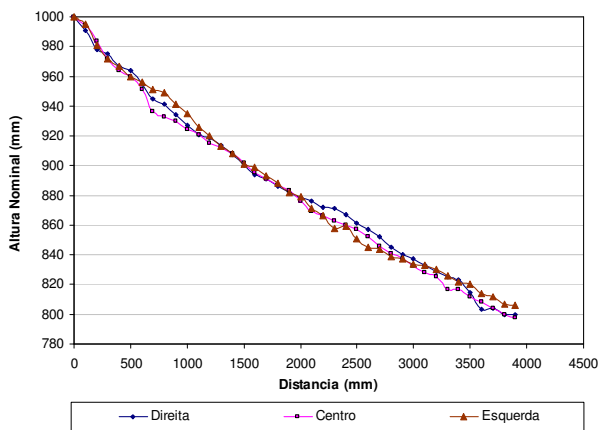
(e) Perfil de permeabilidade ao longo da praia



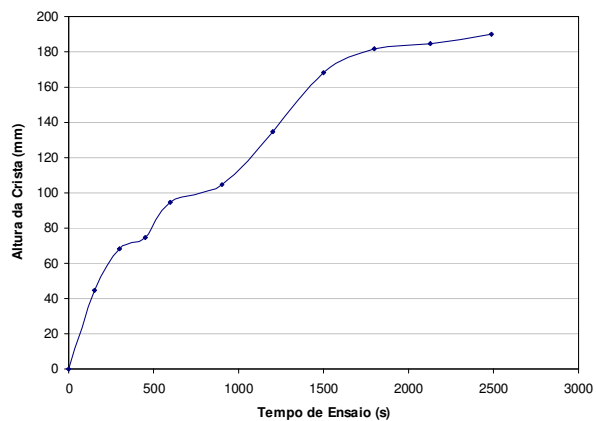
(f) Variação do peso específico dos grãos

Figura D.1. Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro ciclonado (*underflow*) – Ensaio Au Cc-C10Q15

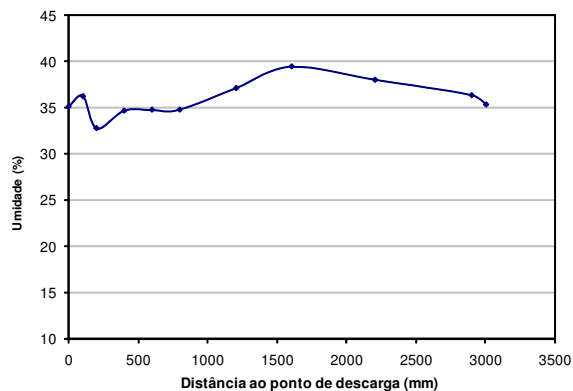




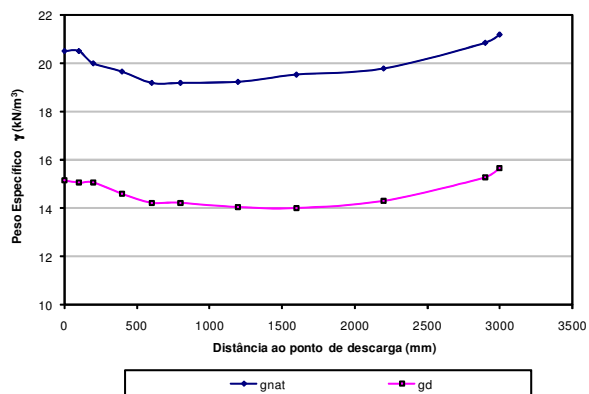
(a) Geometria final da praia



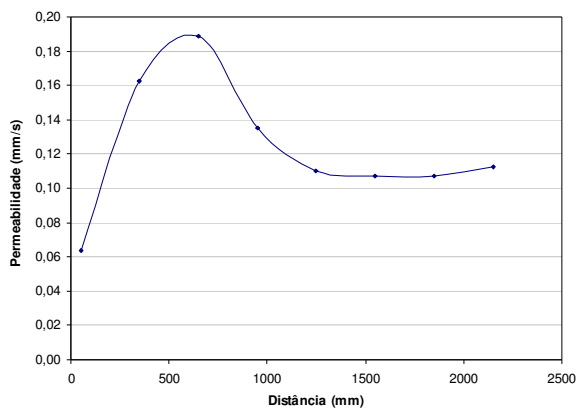
(b) Evolução da altura da crista



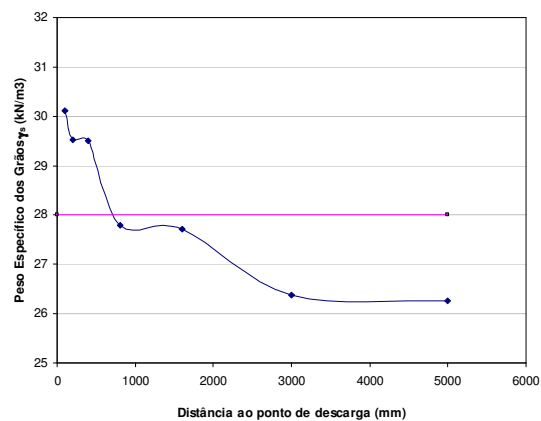
(c) Umidade ao longo da praia



(d) Peso específico ao longo da praia

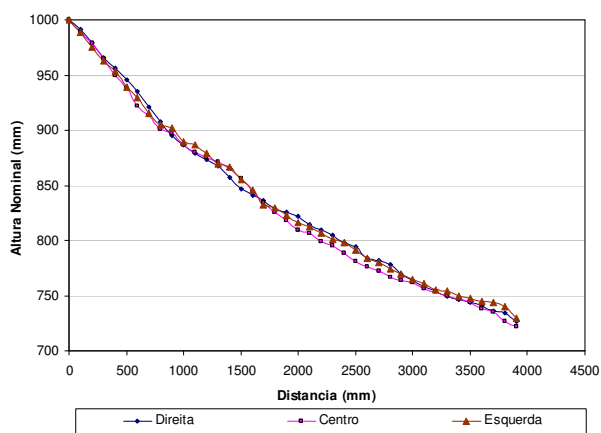


(e) Perfil de permeabilidade ao longo da praia

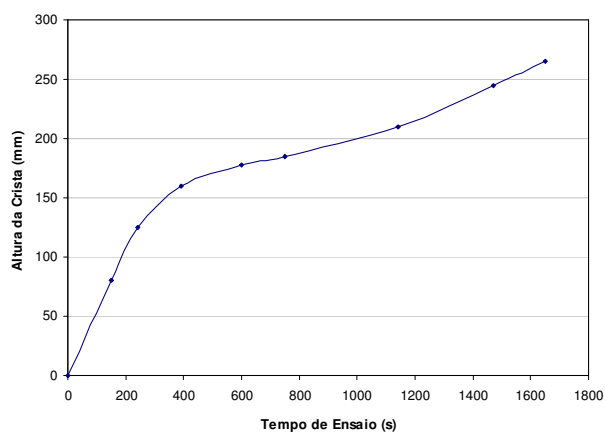


(f) Variação do peso específico dos grãos

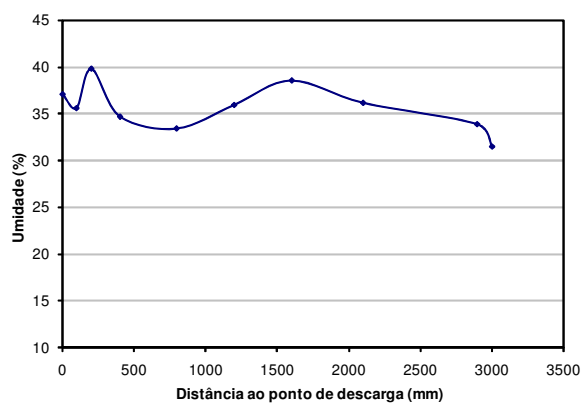
Figura D.2. Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro ciclonado (*underflow*) – Ensaio Au Cc-C10Q15



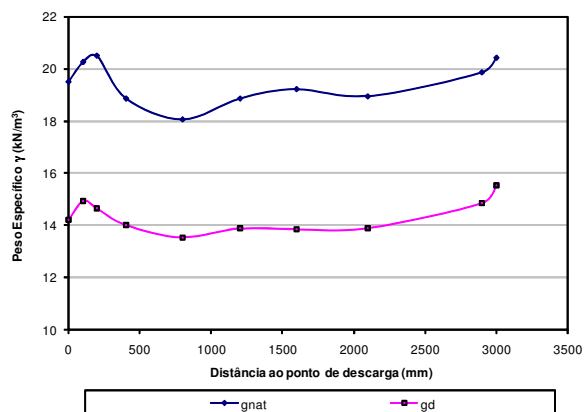
(a) Geometria final da praia



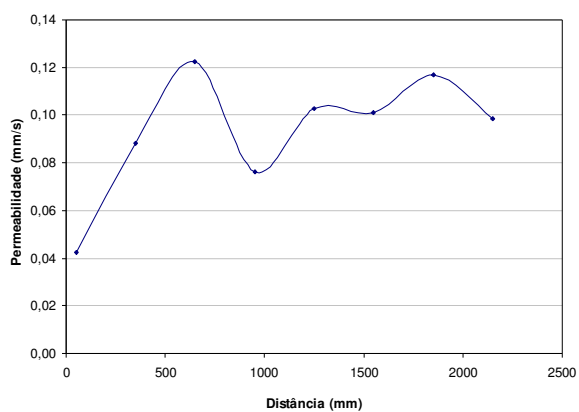
(b) Evolução da altura da crista



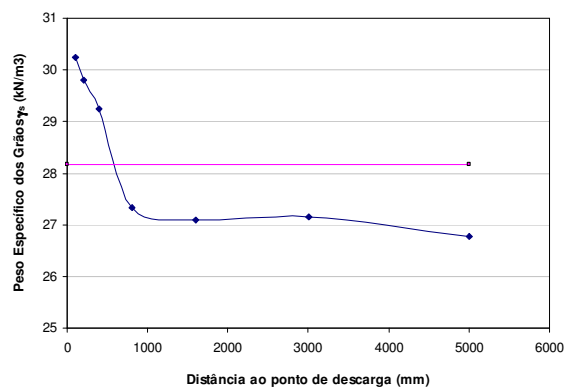
(c) Umidade ao longo da praia



(d) Peso específico ao longo da praia



(e) Perfil de permeabilidade ao longo da praia

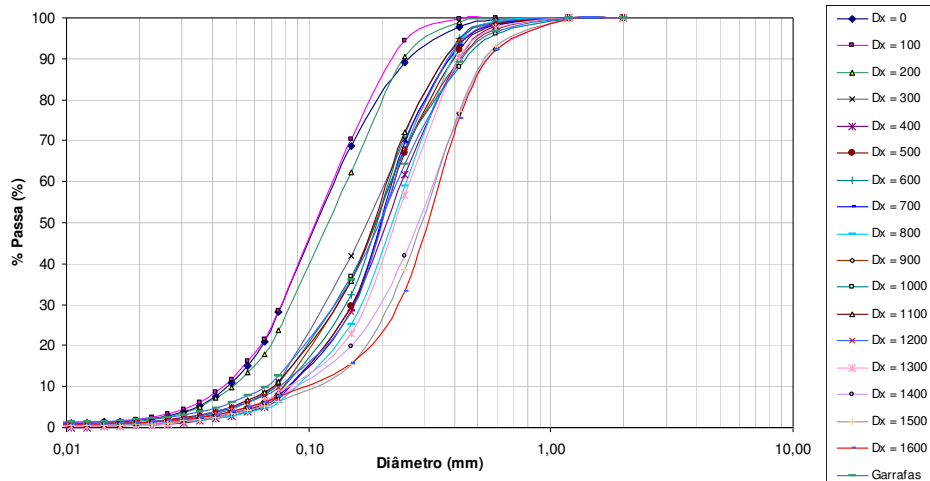


(f) Variação do peso específico dos grãos

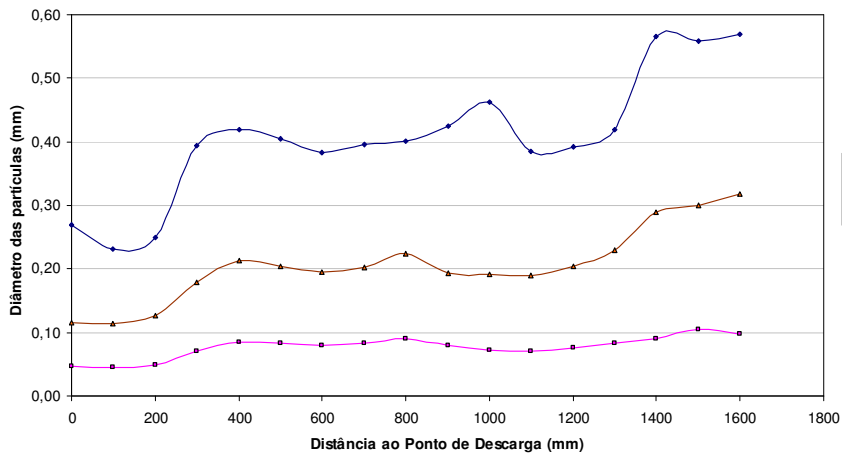
Figura D.3. Resumo dos resultados dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro ciclonado (*underflow*) – Ensaio Au Cc-C10Q20

## **APÊNDICE E**

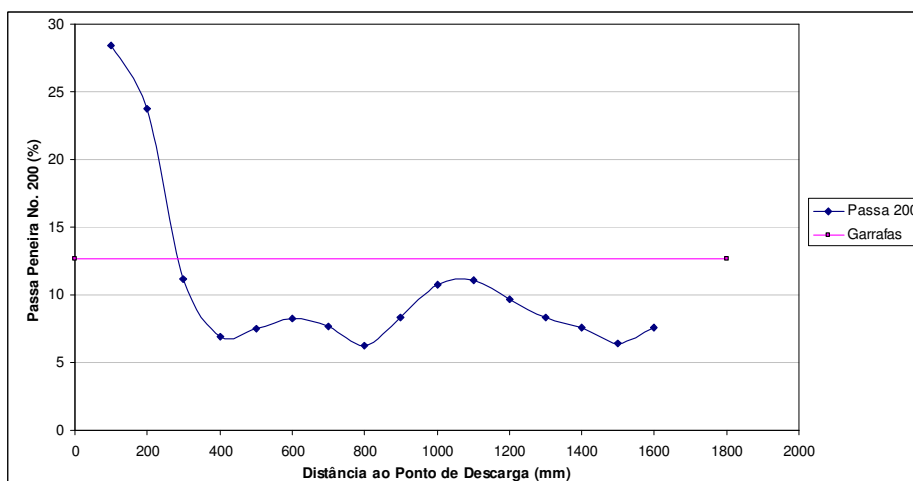
**RESUMO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ANÁLISE  
GRANULOMÉTRICA NO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO**



(a) Curvas granulométricas das amostras ao longo da praia

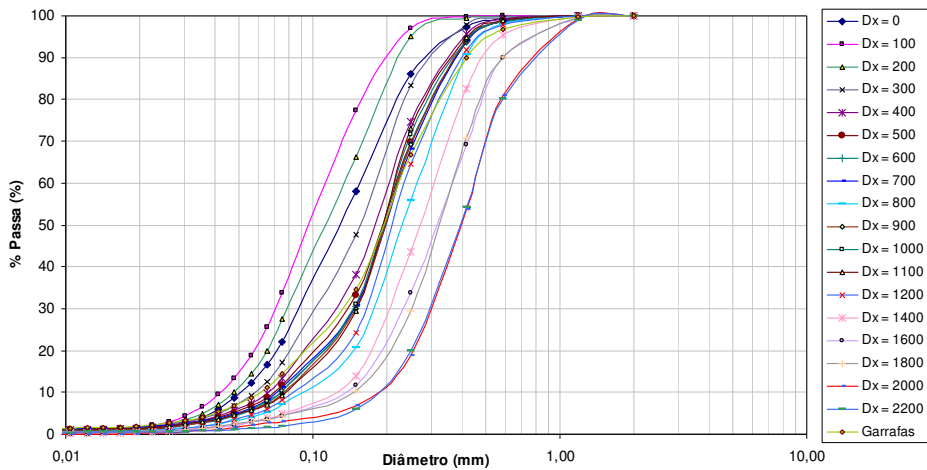


(b) Variação do diâmetro  $D_{90}$ , do diâmetro médio  $D_{50}$  e do diâmetro efetivo  $D_{10}$

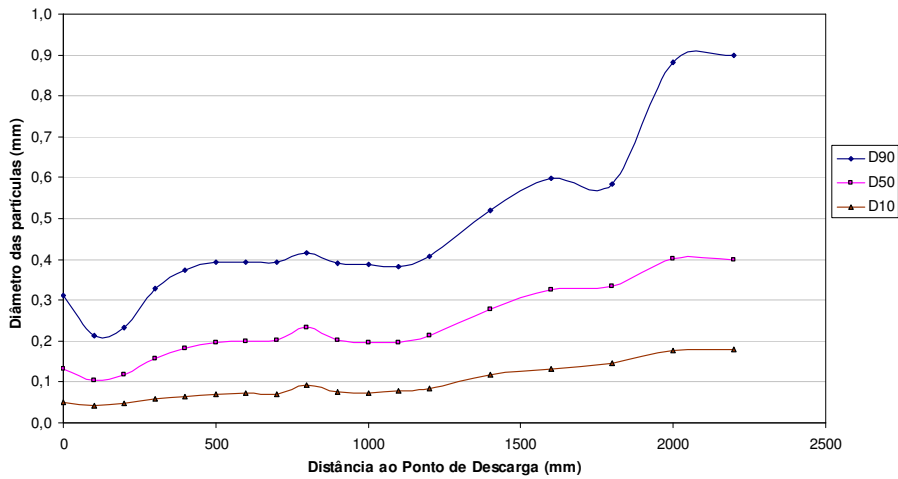


(c) Variação da porcentagem do passa na peneira Nr. 200 (<0,074 mm)

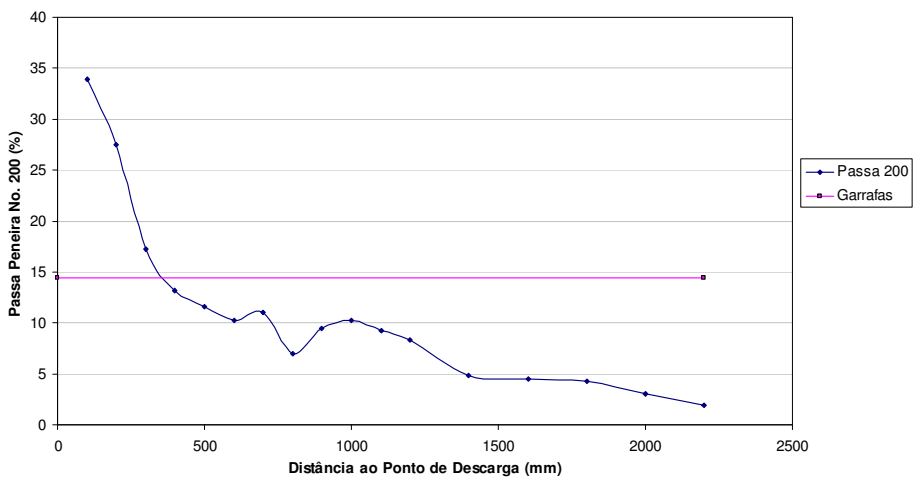
Figura E.1. Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C10Q10



(a) Curvas granulométricas das amostras ao longo da praia

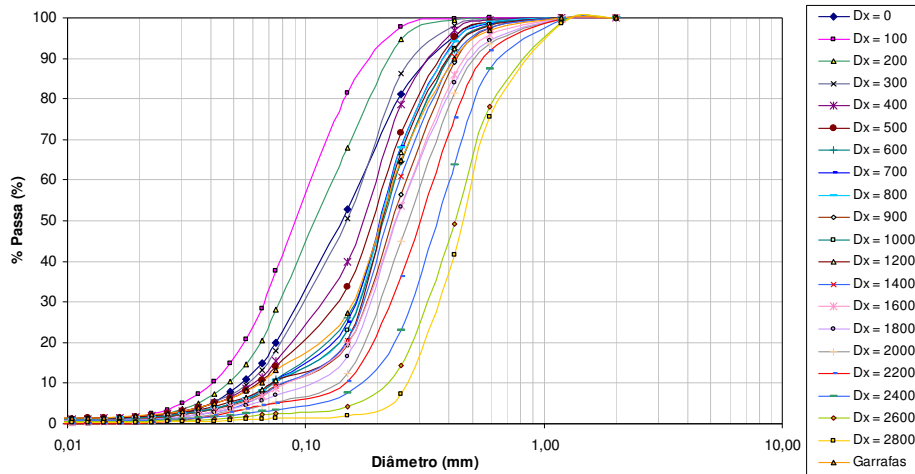


(b) Variação do diâmetro  $D_{90}$ , do diâmetro médio  $D_{50}$  e do diâmetro efetivo  $D_{10}$

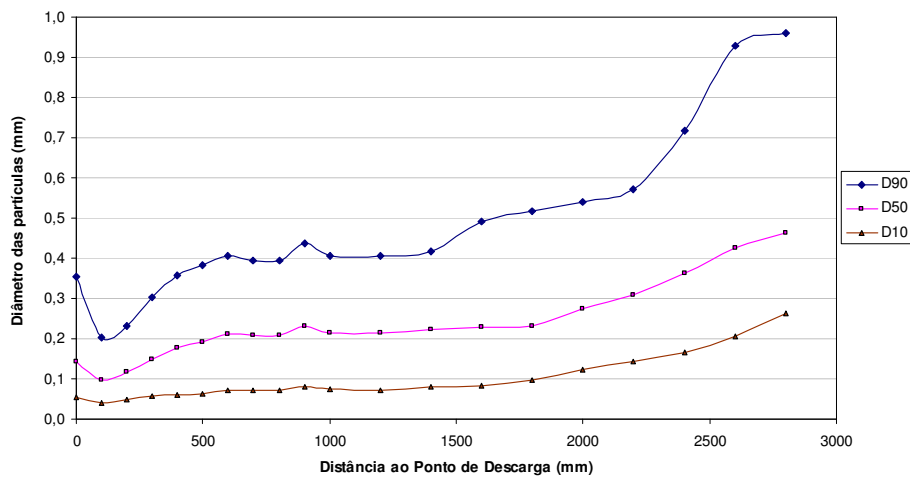


(c) Variação da porcentagem do passa na peneira Nr. 200 (<0,074 mm)

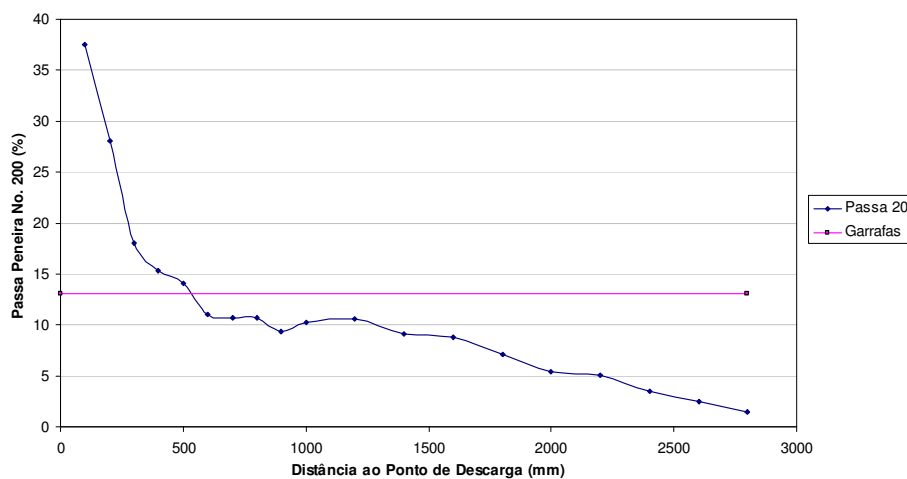
Figura E.2. Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C10Q15



(a) Curvas granulométricas das amostras ao longo da praia

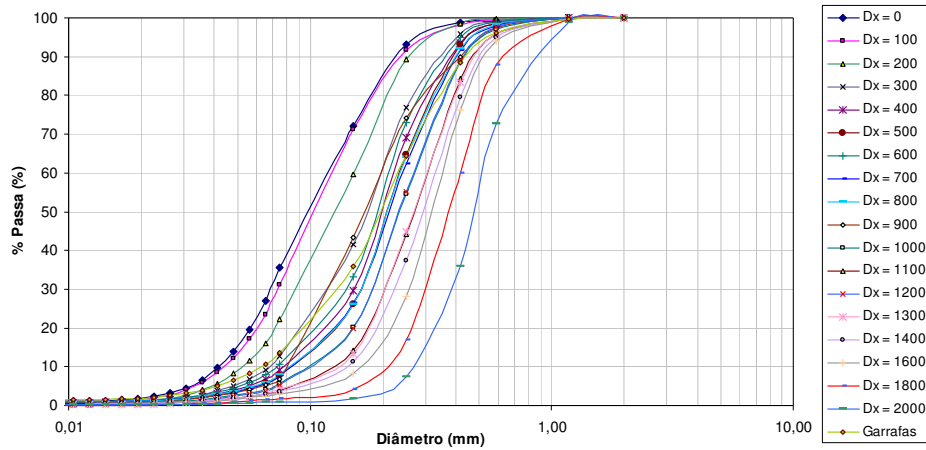


(b) Variação do diâmetro  $D_{90}$ , do diâmetro médio  $D_{50}$  e do diâmetro efetivo  $D_{10}$

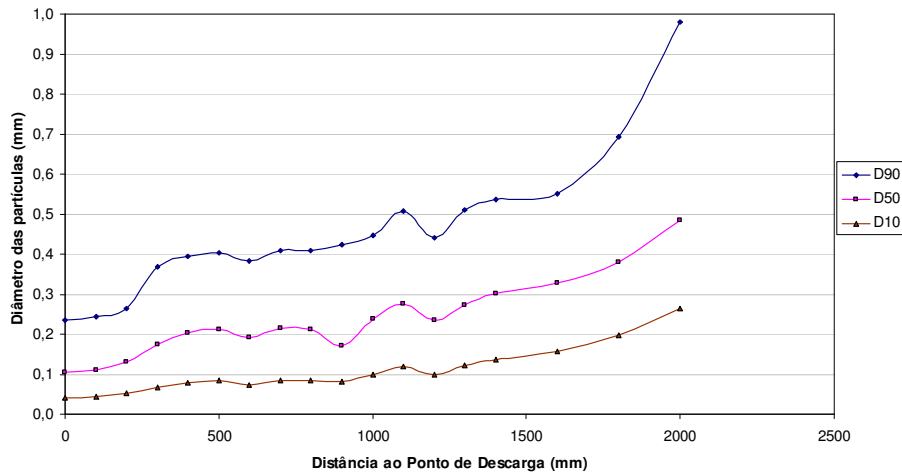


(c) Variação da porcentagem do passa na peneira Nr. 200 (<0,074 mm)

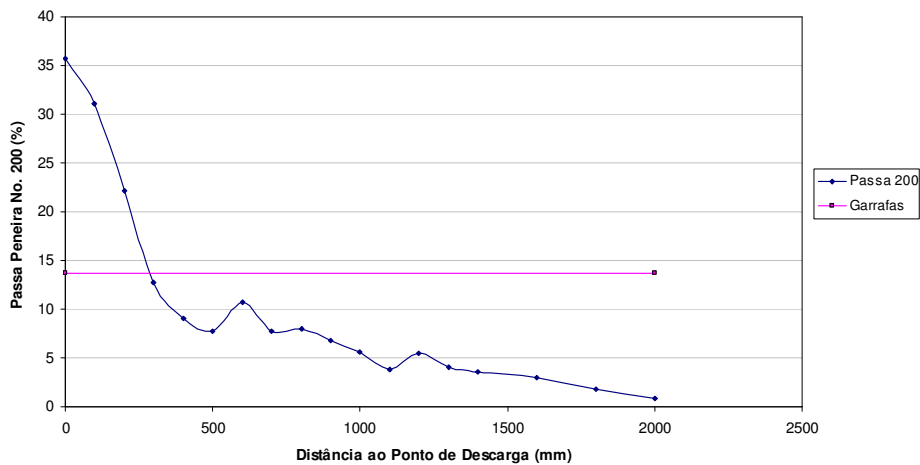
Figura E.3. Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C10Q20



(a) Curvas granulométricas das amostras ao longo da praia

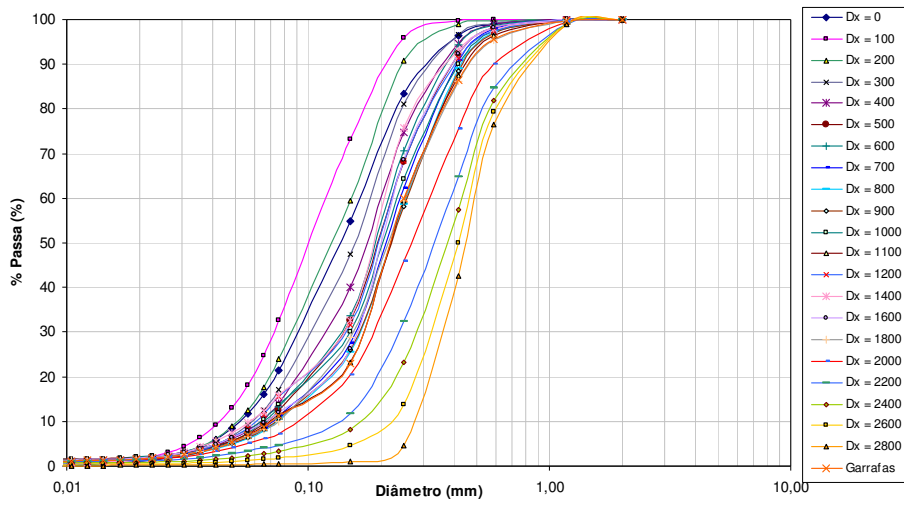


(b) Variação do diâmetro  $D_{90}$ , do diâmetro médio  $D_{50}$  e do diâmetro efetivo  $D_{10}$

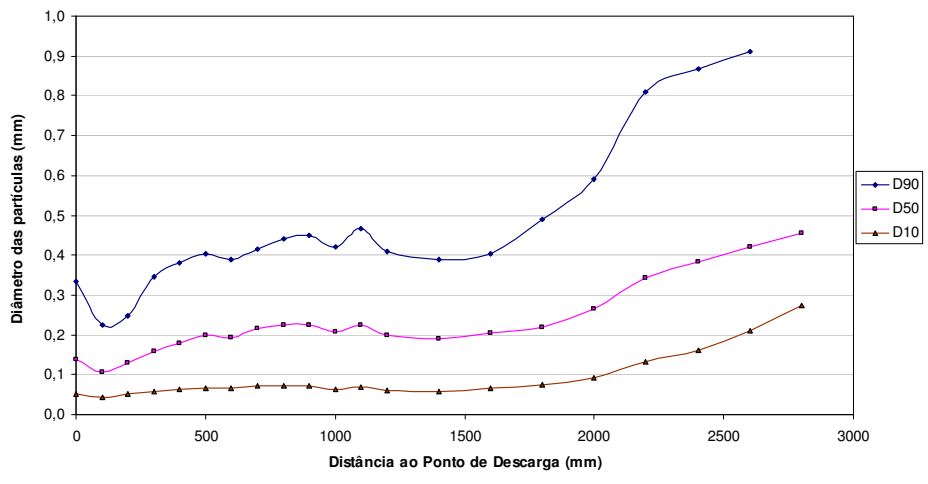


(c) Variação da porcentagem do passa na peneira Nr. 200 (<0,074 mm)

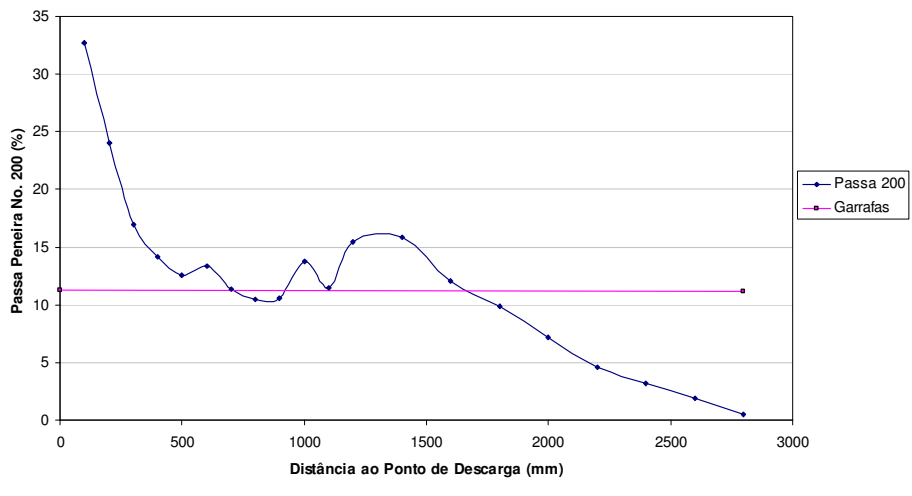
Figura E.4. Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C15Q10



(a) Curvas granulométricas das amostras ao longo da praia



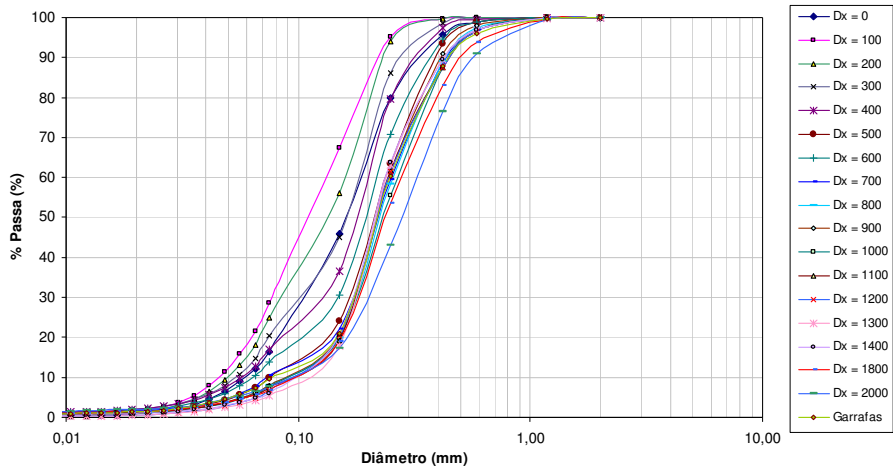
(b) Variação do diâmetro D<sub>90</sub>, do diâmetro médio D<sub>50</sub> e do diâmetro efetivo D<sub>10</sub>



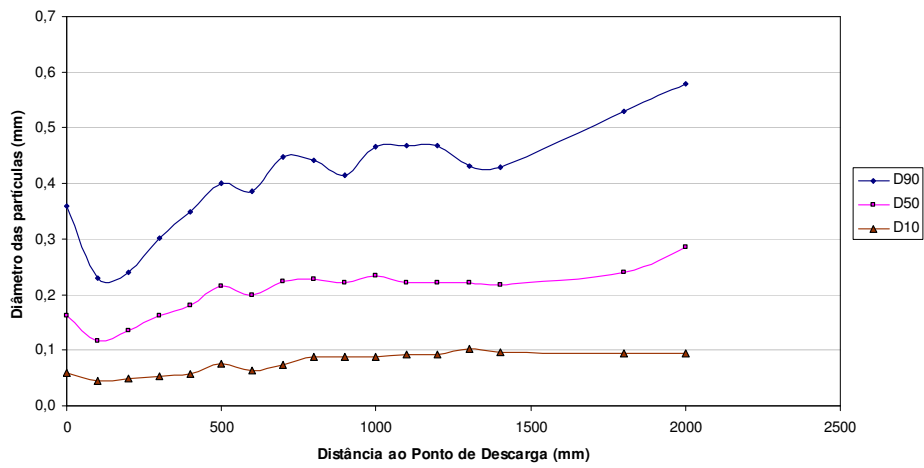
(c) Variação da porcentagem do passa na peneira Nr. 200 (<0,074 mm)

Figura E.5. Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C15Q15

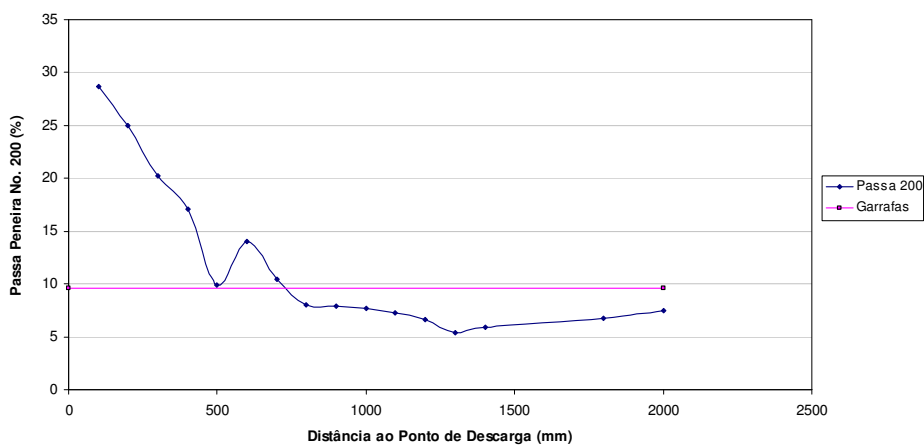




(a) Curvas granulométricas das amostras ao longo da praia

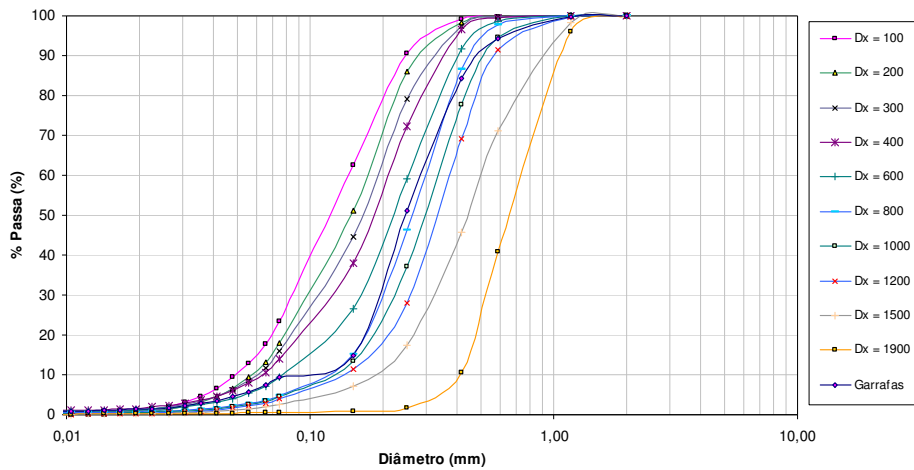


(b) Variação do diâmetro  $D_{90}$ , do diâmetro médio  $D_{50}$  e do diâmetro efetivo  $D_{10}$

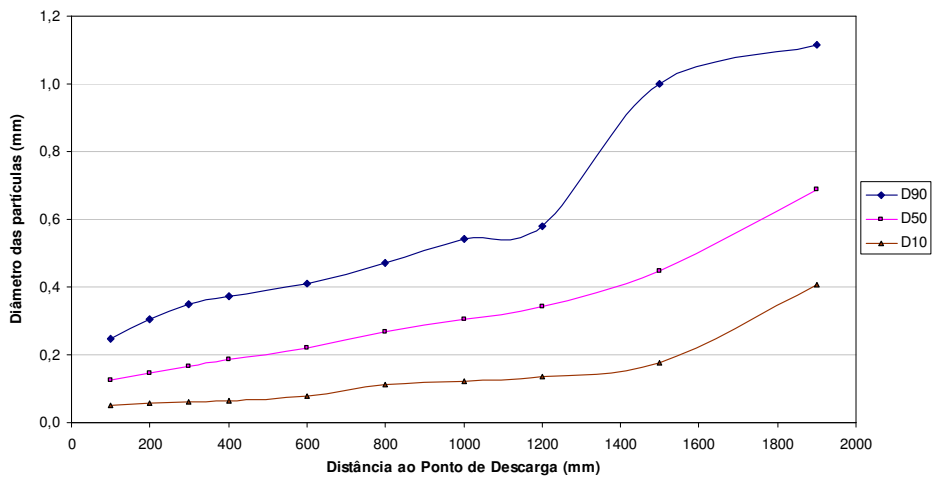


(c) Variação da porcentagem do passa na peneira Nr. 200 (<0,074 mm)

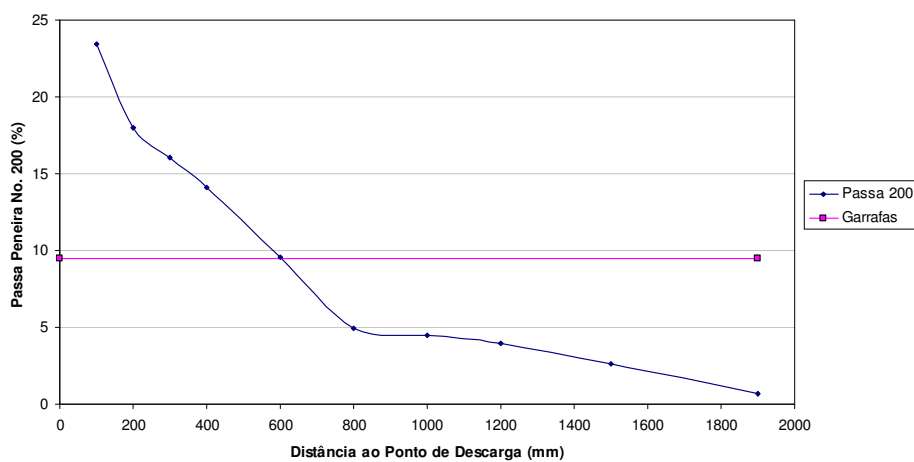
Figura E.6. Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C15Q20



(a) Curvas granulométricas das amostras ao longo da praia

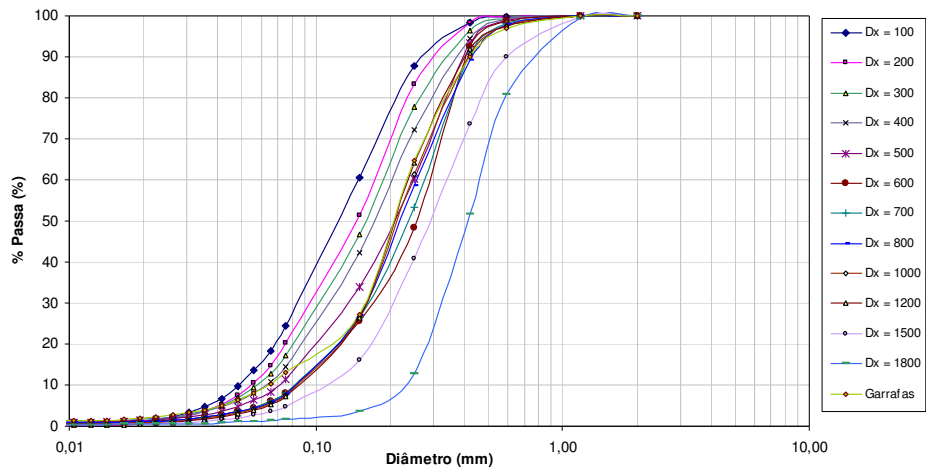


(b) Variação do diâmetro  $D_{90}$ , do diâmetro médio  $D_{50}$  e do diâmetro efetivo  $D_{10}$

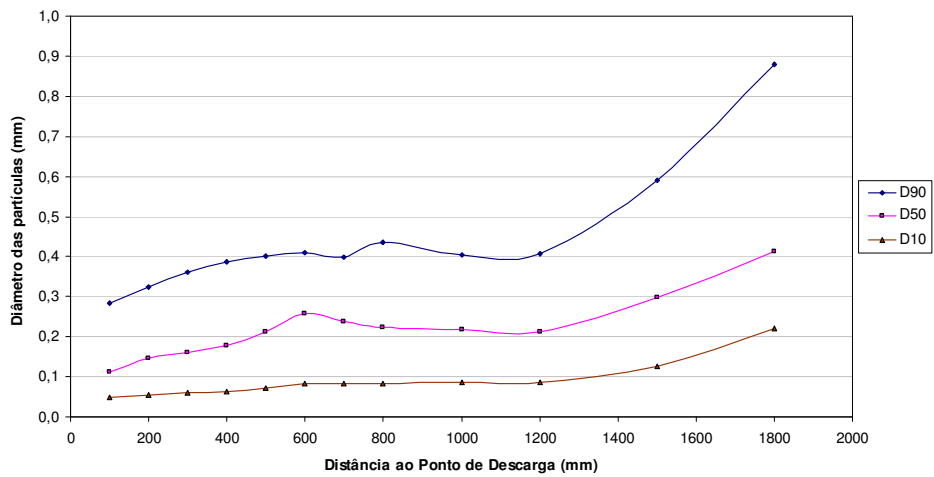


(c) Variação da porcentagem do passa na peneira Nr. 200 (<0,074 mm)

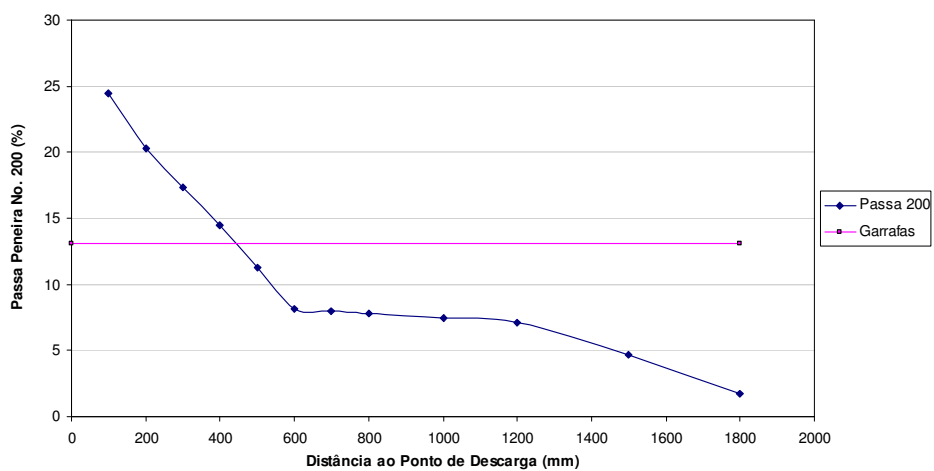
Figura E.7. Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C25Q10



(a) Curvas granulométricas das amostras ao longo da praia

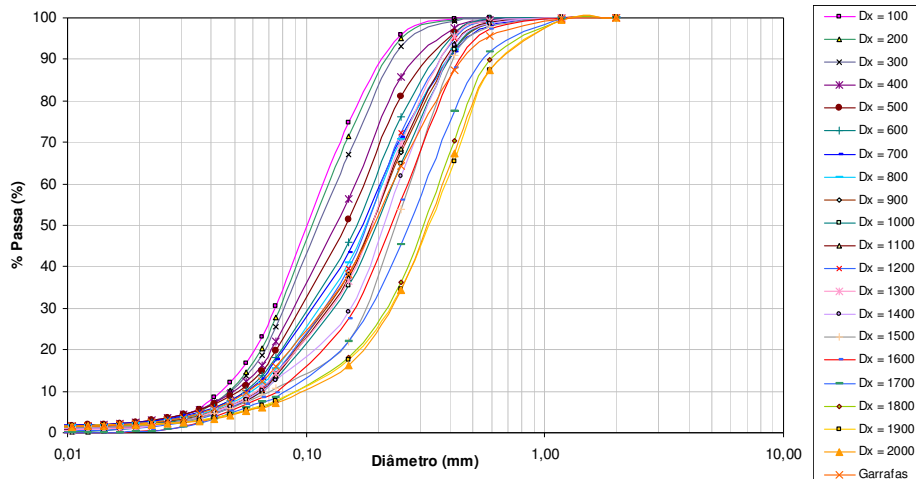


(b) Variação do diâmetro  $D_{90}$ , do diâmetro médio  $D_{50}$  e do diâmetro efetivo  $D_{10}$

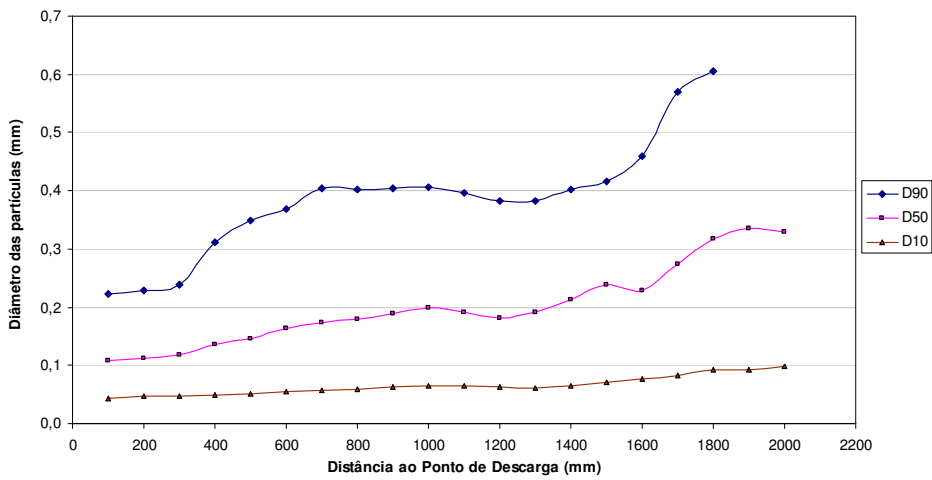


(c) Variação da porcentagem do passa na peneira Nr. 200 (<0,074 mm)

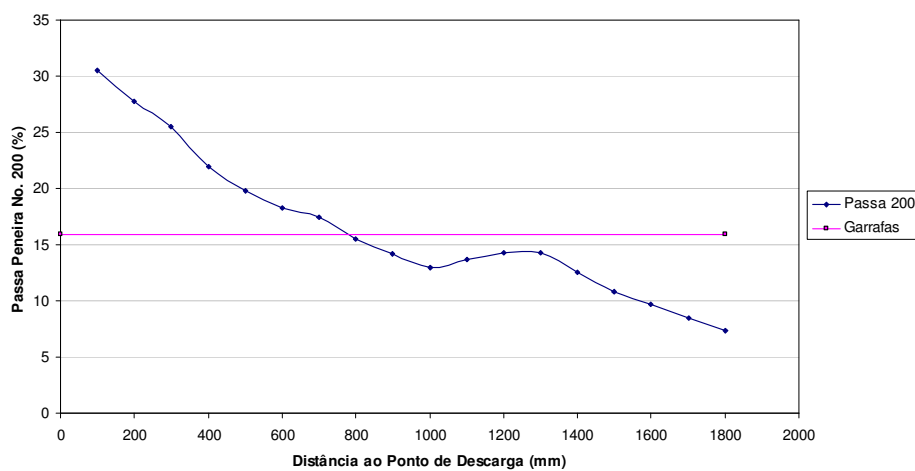
Figura E.8. Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C25Q15



(a) Curvas granulométricas das amostras ao longo da praia



(b) Variação do diâmetro  $D_{90}$ , do diâmetro médio  $D_{50}$  e do diâmetro efetivo  $D_{10}$

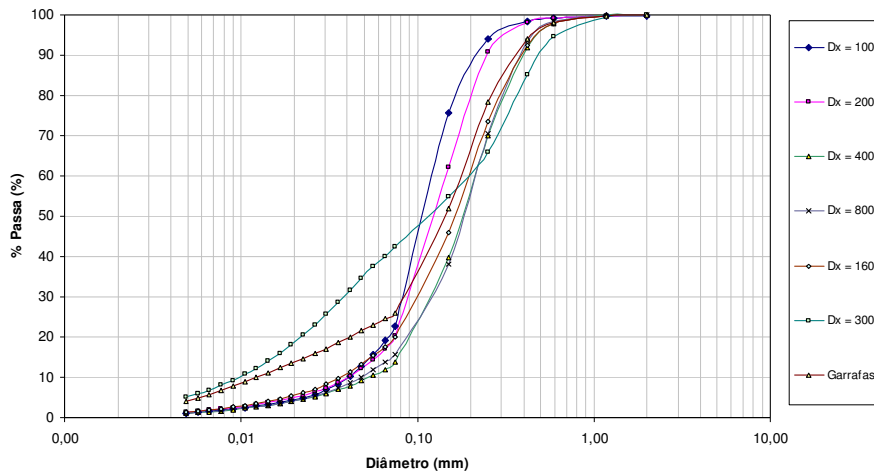


(c) Variação da porcentagem do passa na peneira Nr. 200 (<0,074 mm)

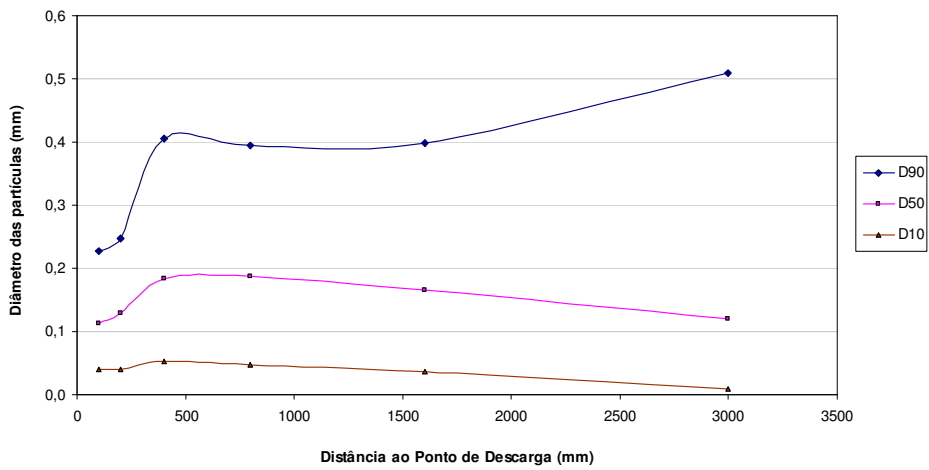
Figura E.9. Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ferro – Ensaio Fe-C25Q20

## **APÊNDICE F**

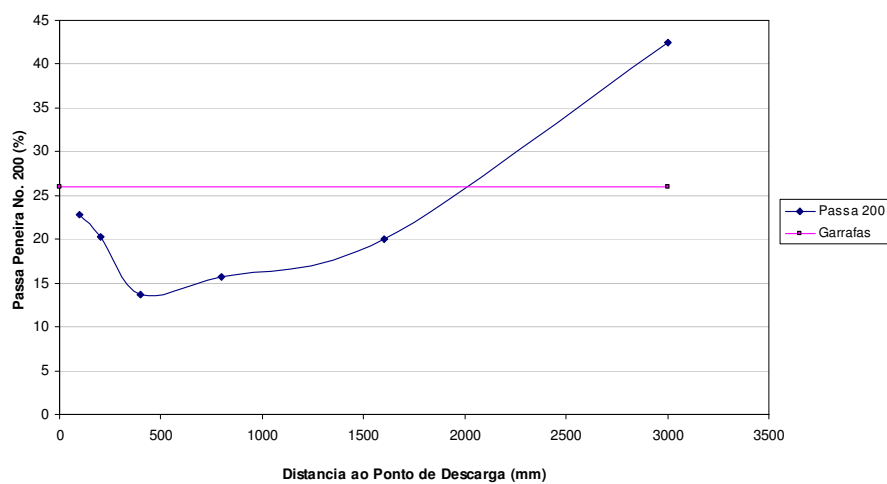
**RESUMO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ANÁLISE  
GRANULOMÉTRICA NO REJEITO DE MINÉRIO DE OURO**



(a) Curvas granulométricas das amostras ao longo da praia

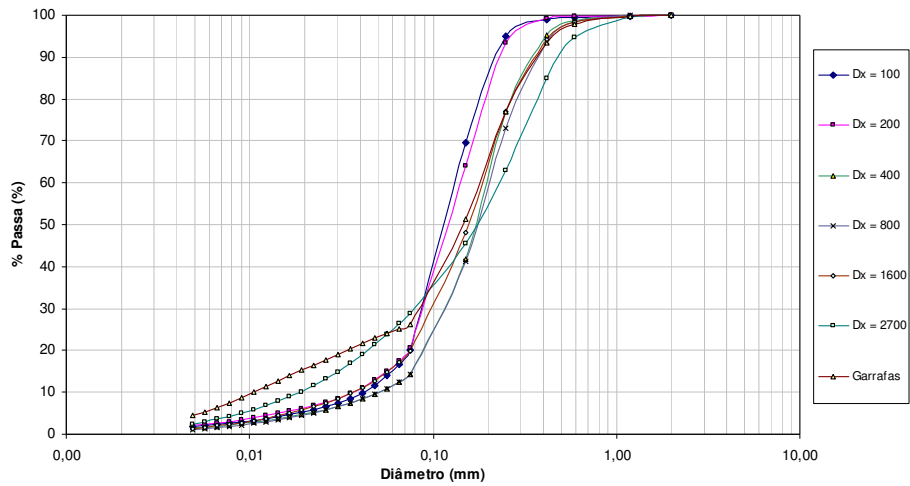


(b) Variação do diâmetro  $D_{90}$ , do diâmetro médio  $D_{50}$  e do diâmetro efetivo  $D_{10}$

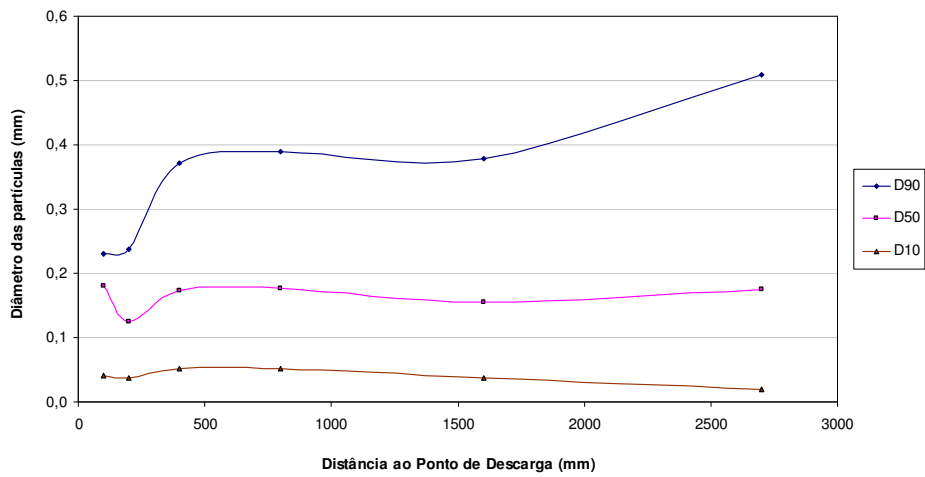


(c) Variação da porcentagem do passa na peneira No. 200 ( $<0,074$  mm)

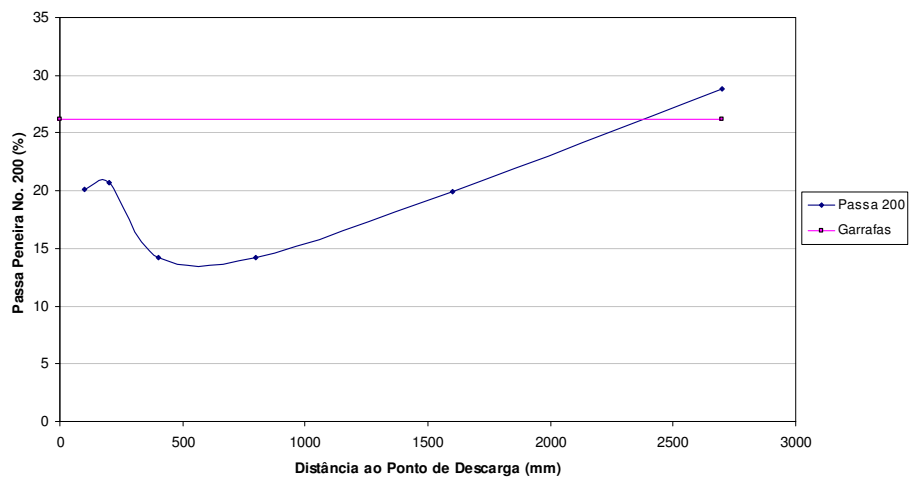
Figura F.1. Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C10Q10



(a) Curvas granulométricas das amostras ao longo da praia

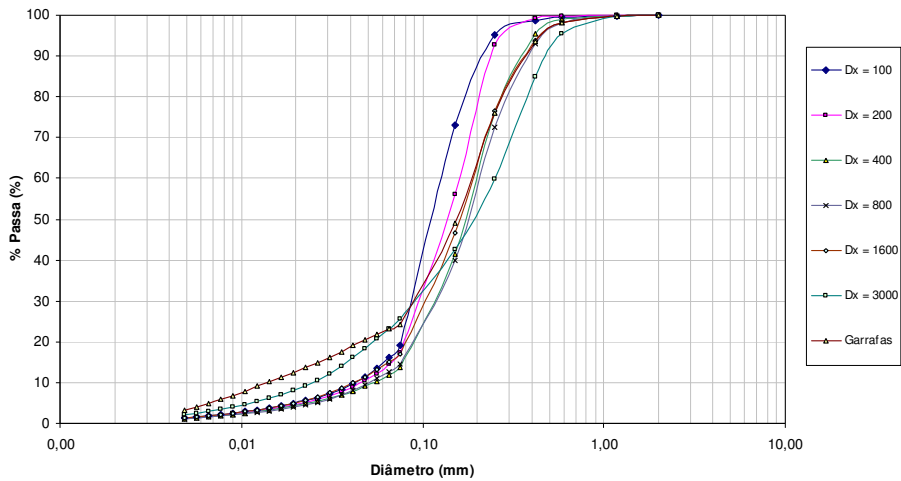


(b) Variação do diâmetro  $D_{90}$ , do diâmetro médio  $D_{50}$  e do diâmetro efetivo  $D_{10}$

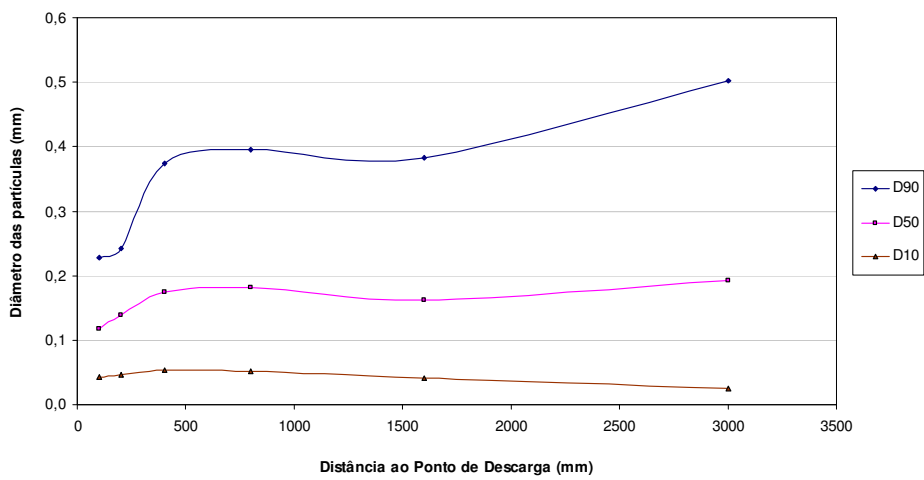


(c) Variação da porcentagem do passa na peneira No. 200 (<0,074 mm)

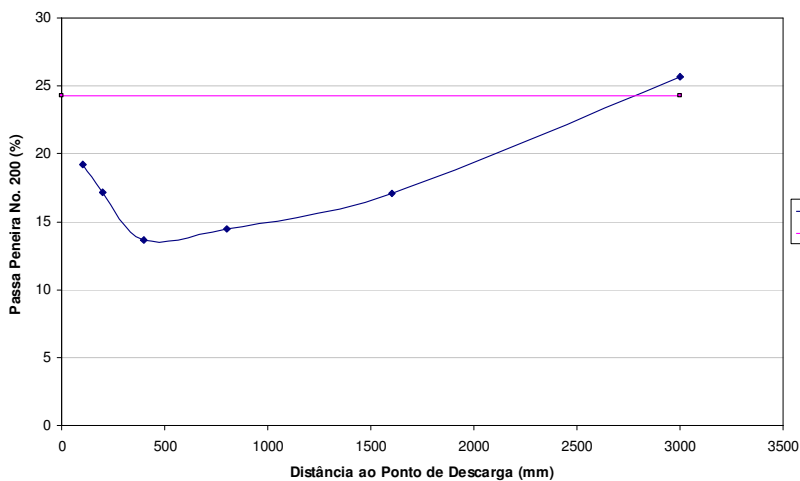
Figura F.2. Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C10Q15



(a) Curvas granulométricas das amostras ao longo da praia



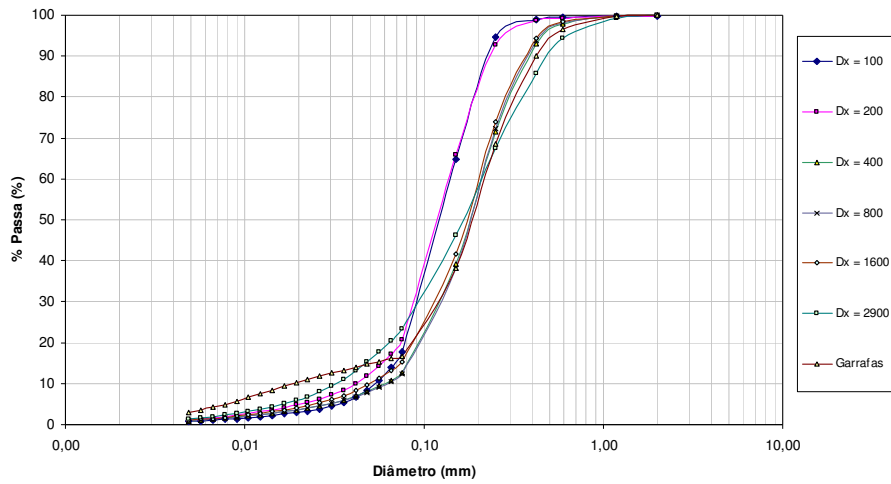
(b) Variação do diâmetro  $D_{90}$ , do diâmetro médio  $D_{50}$  e do diâmetro efetivo  $D_{10}$



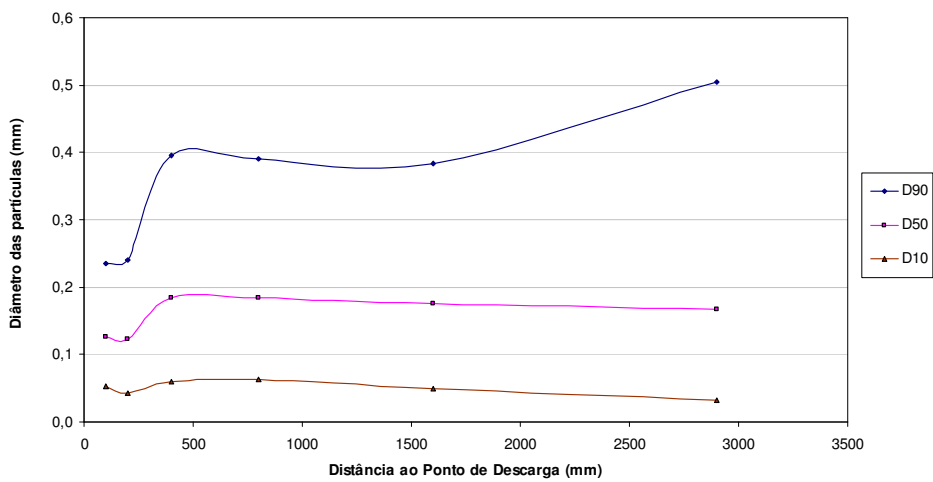
(c) Variação da porcentagem do passa na peneira No. 200 ( $<0,074$  mm)

Figura F.3. Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C10Q20

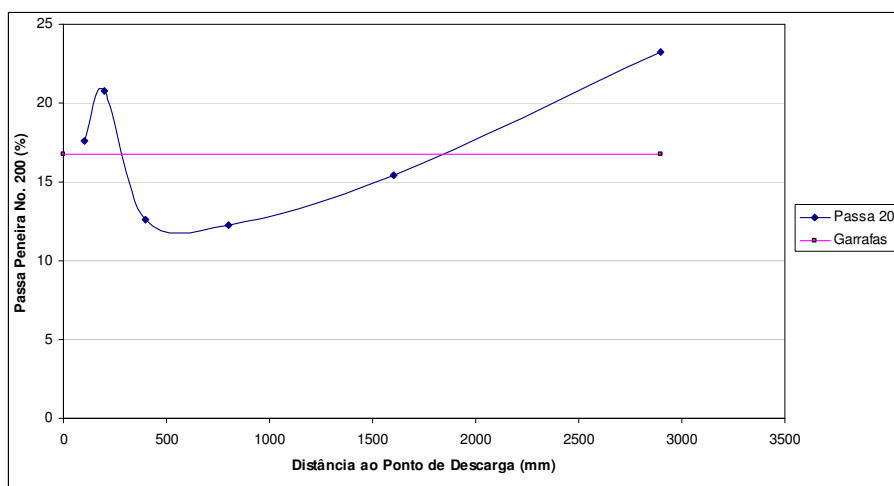




(a) Curvas granulométricas das amostras ao longo da praia

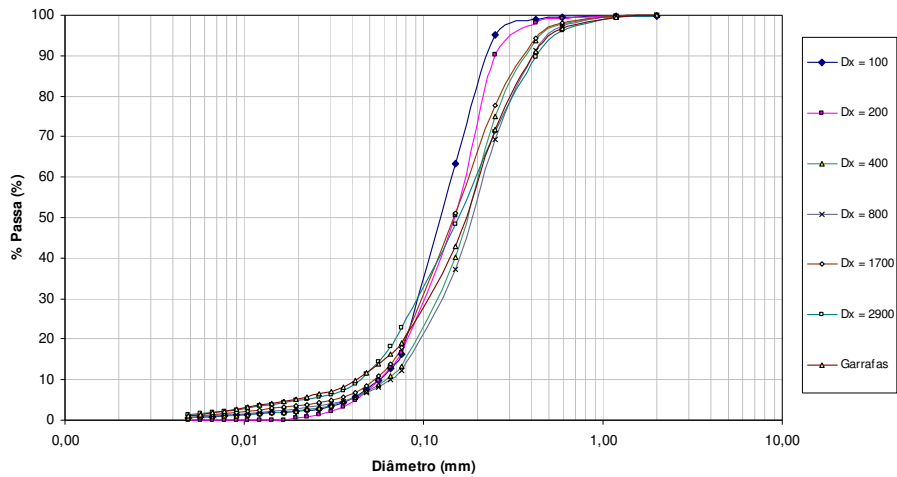


(b) Variação do diâmetro  $D_{90}$ , do diâmetro médio  $D_{50}$  e do diâmetro efetivo  $D_{10}$

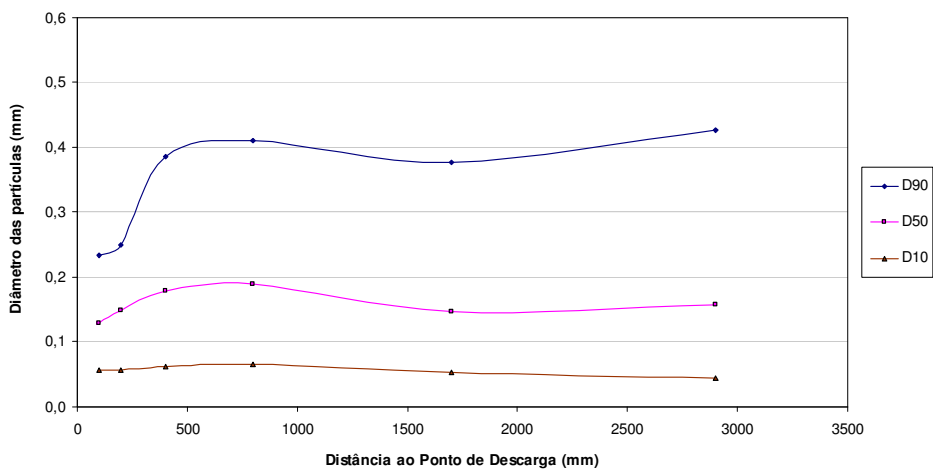


(c) Variação da percentagem do passa na peneira No. 200 (<0,074 mm)

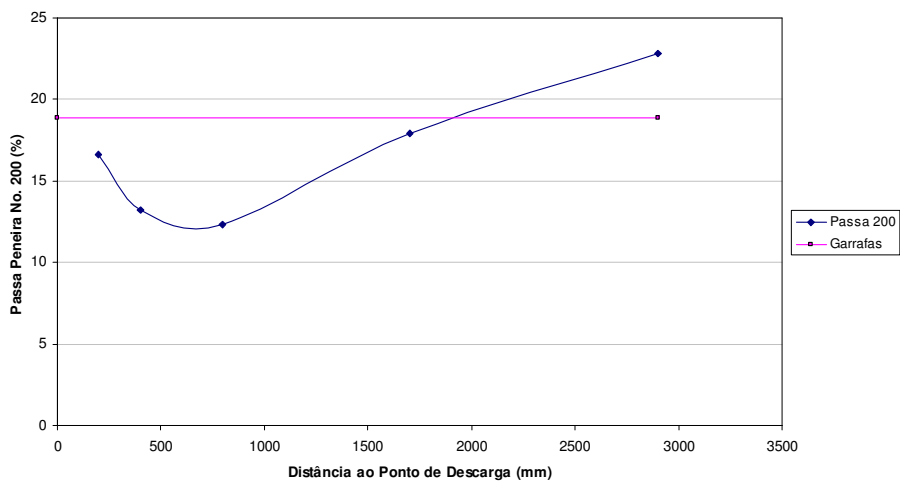
Figura F.4. Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C15Q10



(a) Curvas granulométricas das amostras ao longo da praia

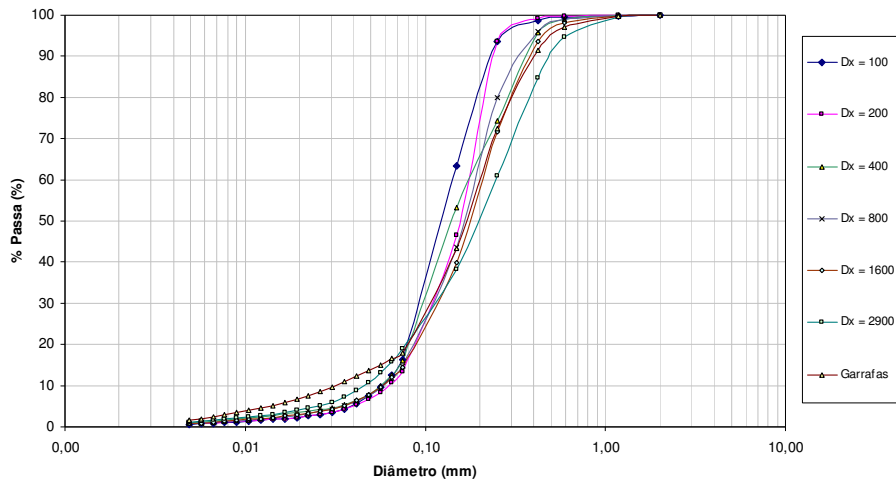


(b) Variação do diâmetro  $D_{90}$ , do diâmetro médio  $D_{50}$  e do diâmetro efetivo  $D_{10}$

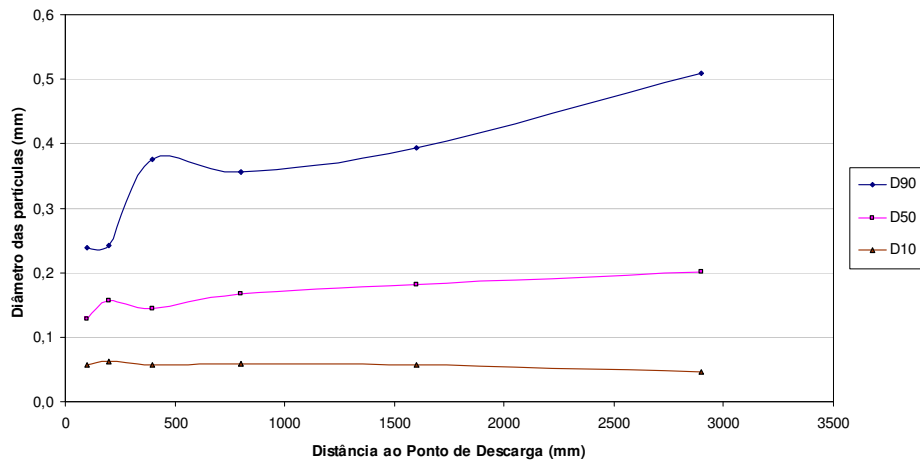


(c) Variação da porcentagem do passa na peneira No. 200 (<0,074 mm)

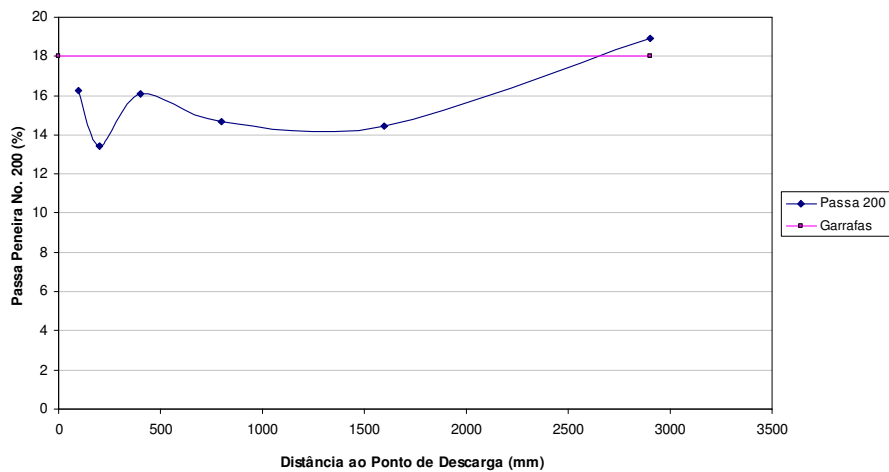
Figura F.5 Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C15Q15



(a) Curvas granulométricas das amostras ao longo da praia

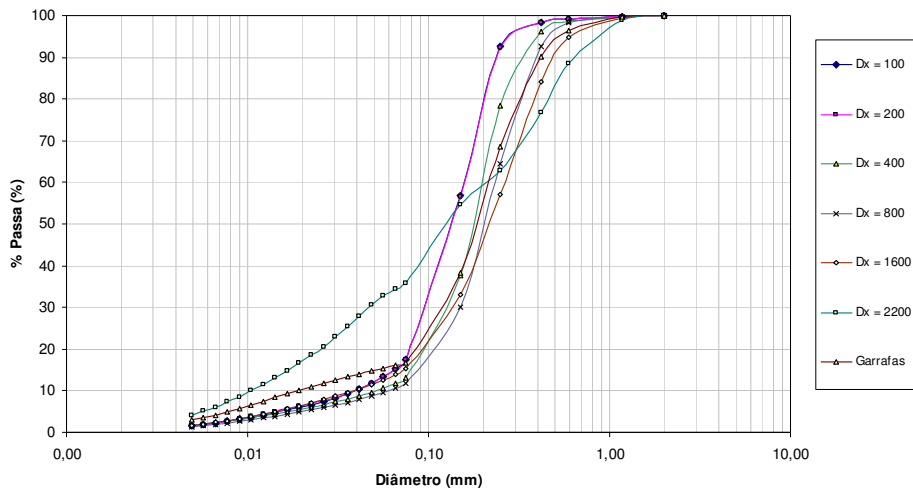


(b) Variação do diâmetro  $D_{90}$ , do diâmetro médio  $D_{50}$  e do diâmetro efetivo  $D_{10}$

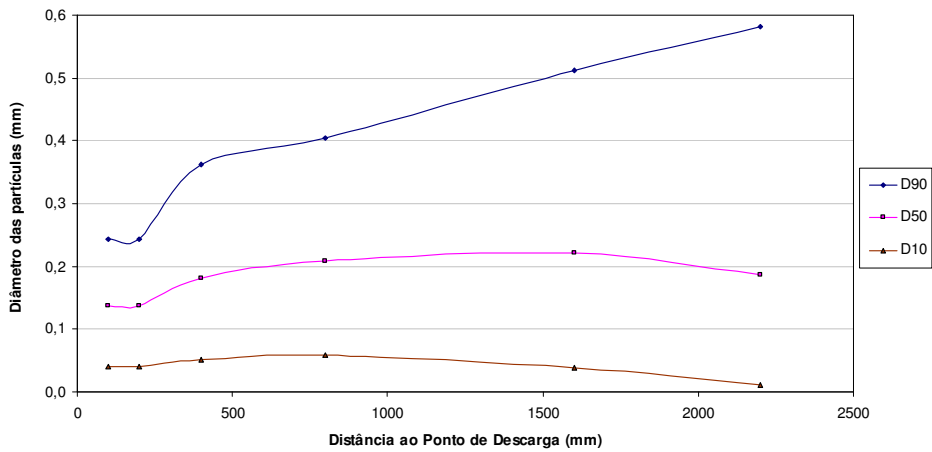


(c) Variação da porcentagem do passa na peneira No. 200 (<0,074 mm)

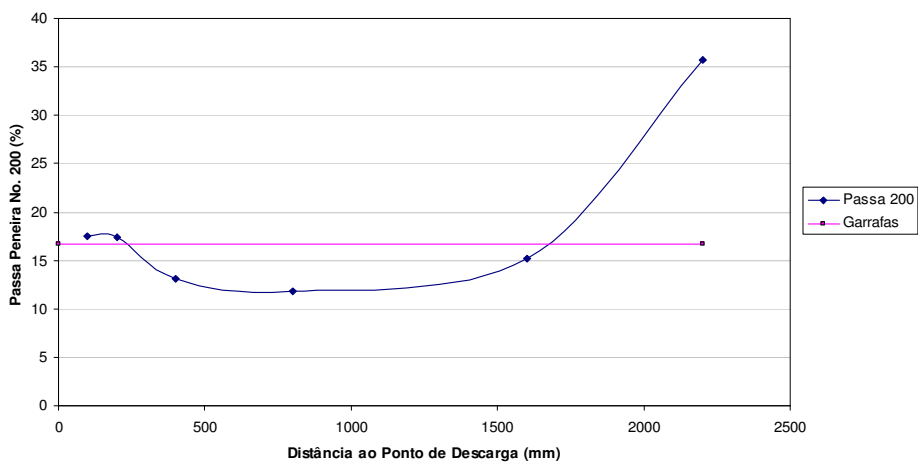
Figura F.6. Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C15Q20



(a) Curvas granulométricas das amostras ao longo da praia

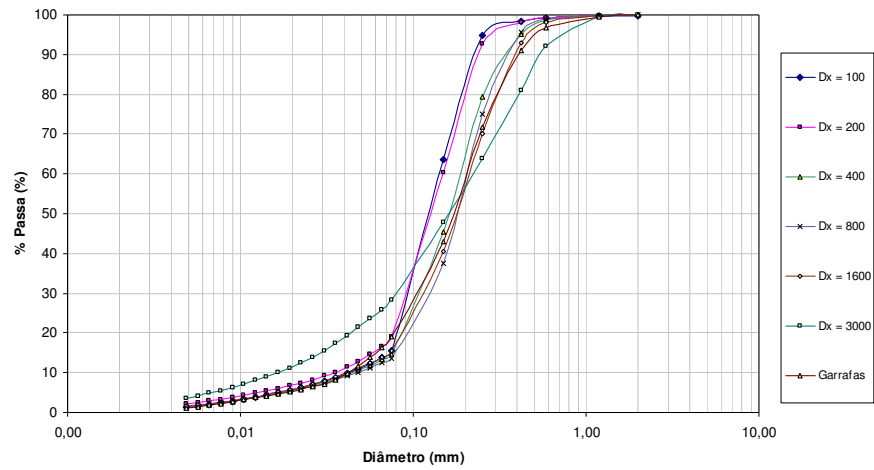


(b) Variação do diâmetro  $D_{90}$ , do diâmetro médio  $D_{50}$  e do diâmetro efetivo  $D_{10}$

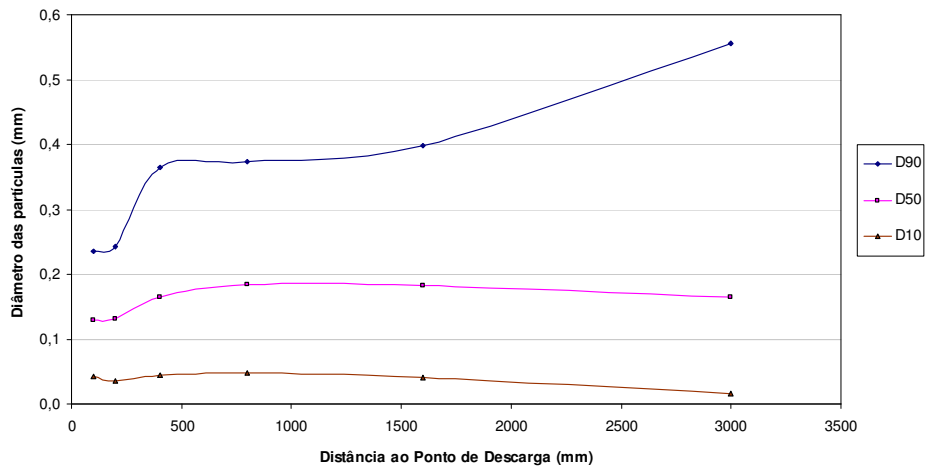


(c) Variação da porcentagem do passa na peneira No. 200 (<math><0,074\text{ mm}</math>)

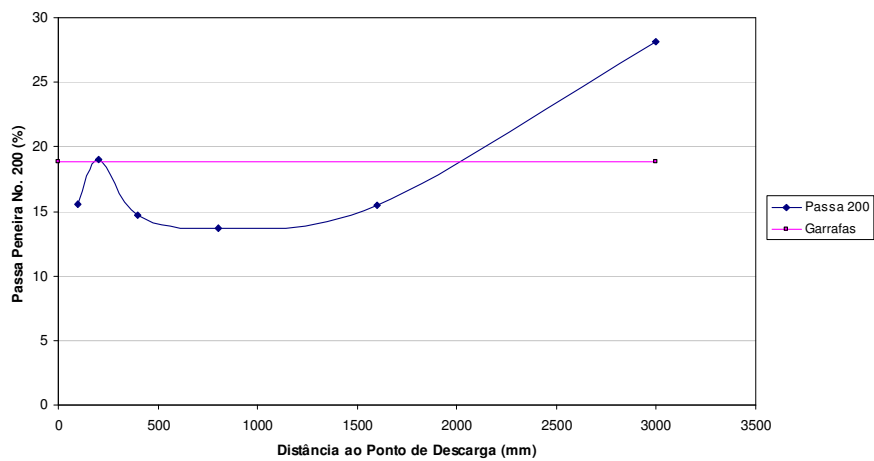
Figura F.7. Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C25Q10



(a) Curvas granulométricas das amostras ao longo da praia

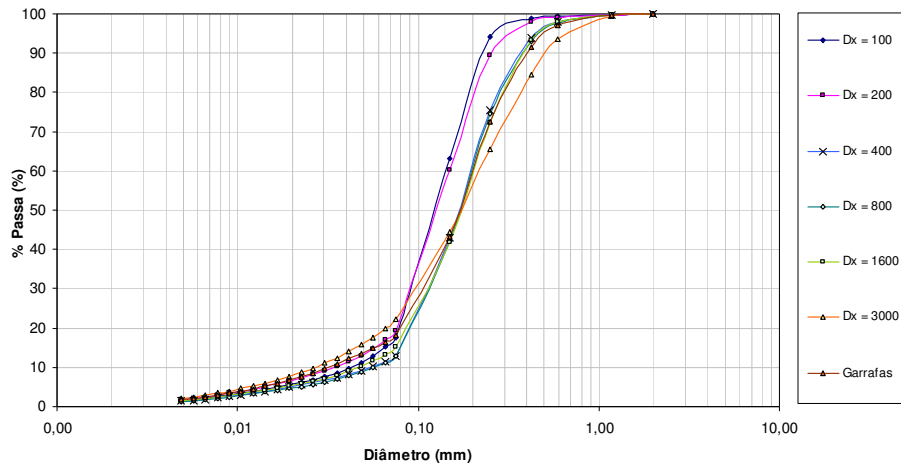


(b) Variação do diâmetro  $D_{90}$ , do diâmetro médio  $D_{50}$  e do diâmetro efetivo  $D_{10}$

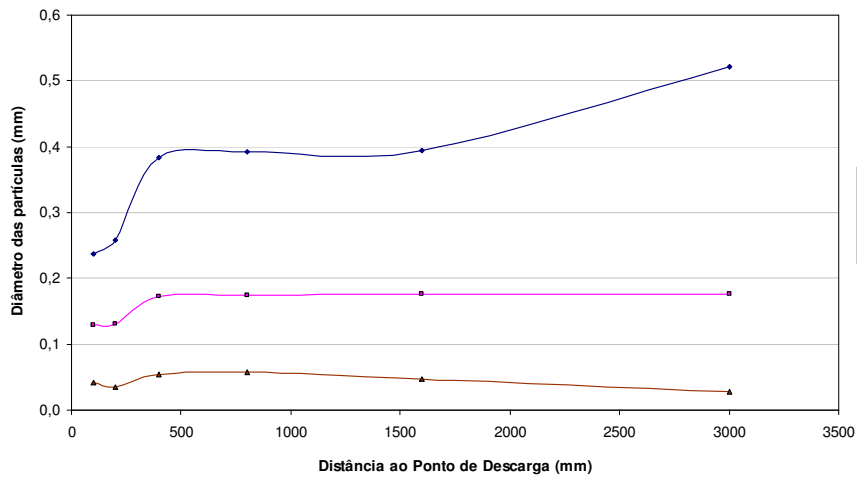


(c) Variação da porcentagem do passa na peneira No. 200 (<math><0,074\text{ mm}</math>)

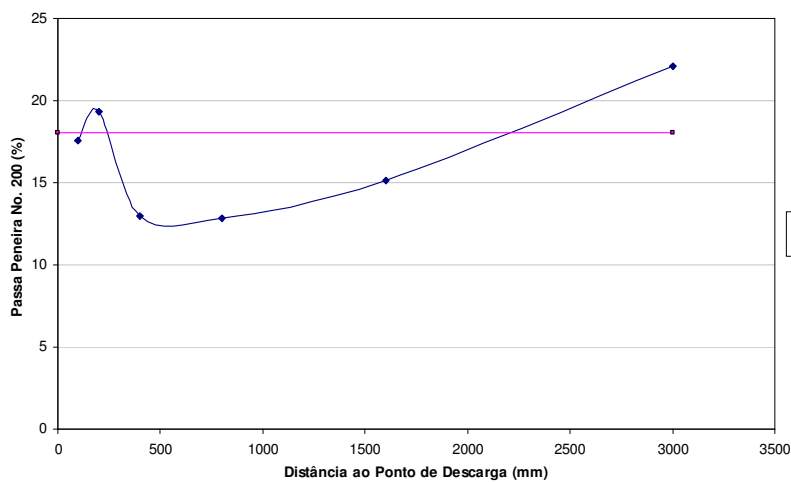
Figura F.8. Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C25Q15



(a) Curvas granulométricas das amostras ao longo da praia



(b) Variação do diâmetro  $D_{90}$ , do diâmetro médio  $D_{50}$  e do diâmetro efetivo  $D_{10}$

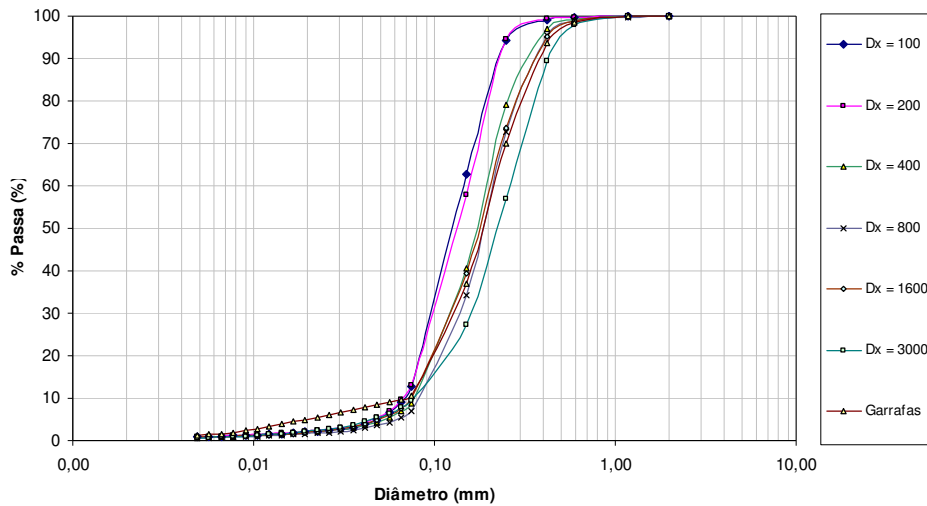


(c) Variação da porcentagem do passa na peneira No. 200 (<0,074 mm)

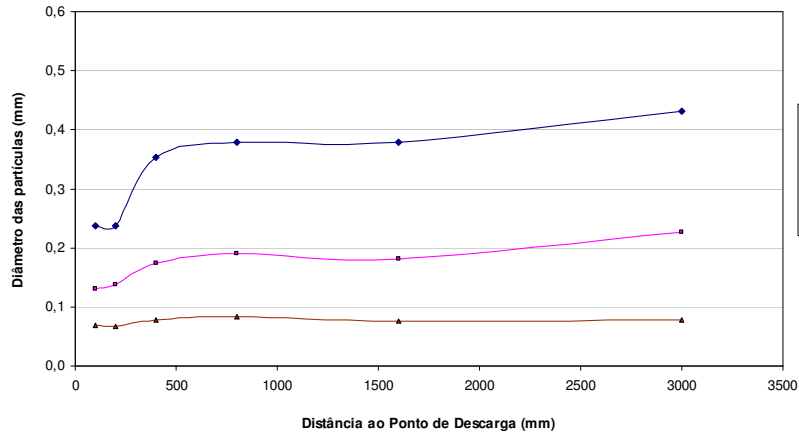
Figura F.9. Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro – Ensaio Au-C25Q20

## **APÊNDICE G**

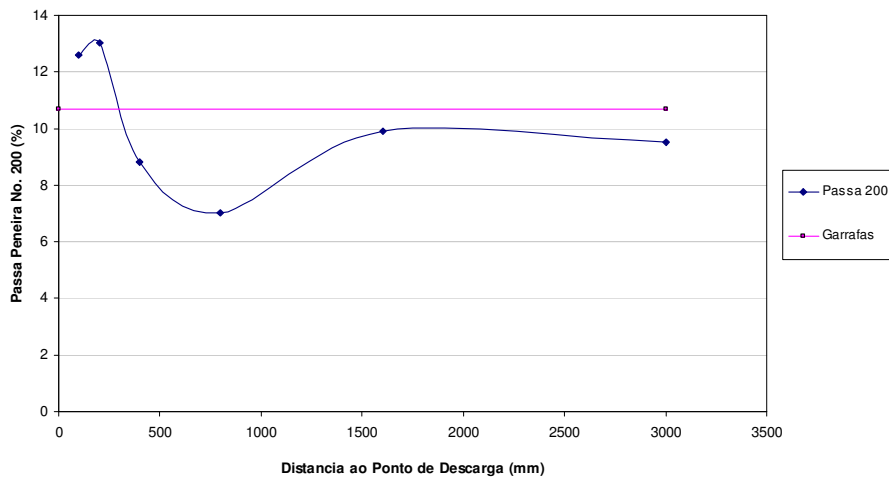
RESUMO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ANÁLISE  
GRANULOMÉTRICA NO REJEITO DE MINÉRIO DE OURO CICLONADO  
(*Underflow*)



(a) Curvas granulométricas das amostras ao longo da praia



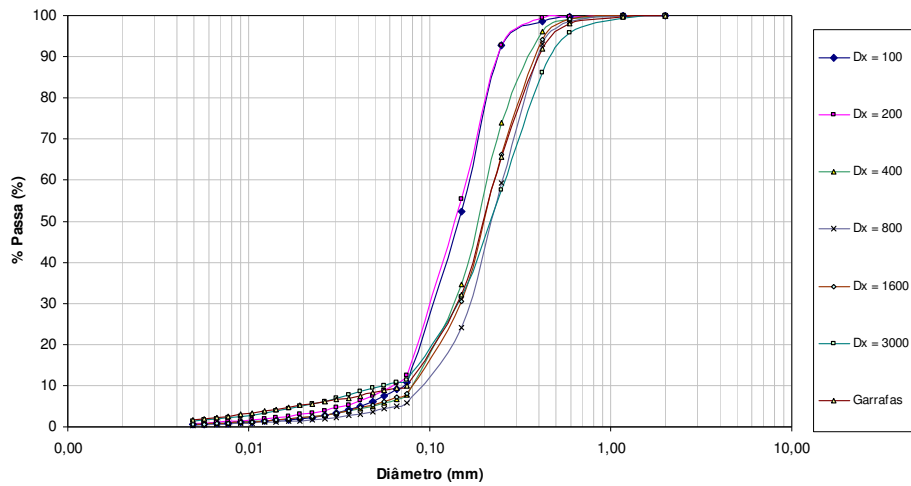
(b) Variação do diâmetro  $D_{90}$ , do diâmetro médio  $D_{50}$  e do diâmetro efetivo  $D_{10}$



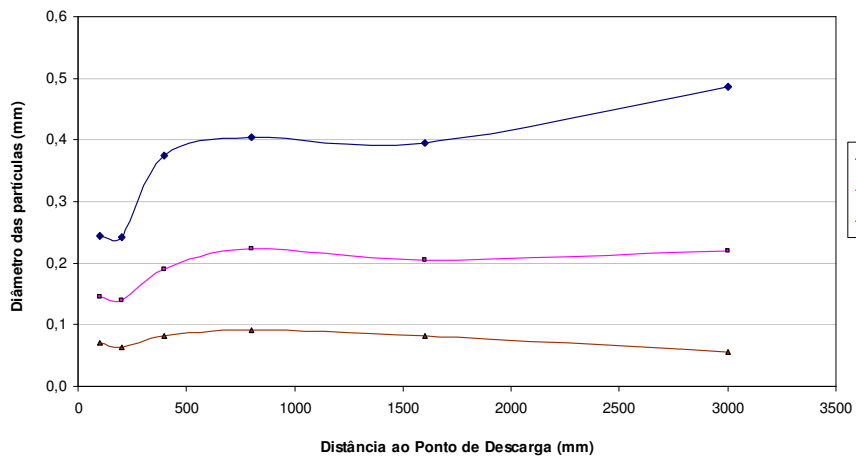
(c) Variação da percentagem do passa na peneira No. 200 (<0,074 mm)

Figura G.1. Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro ciclonado (*underflow*) – Ensaio Au Cc-C10Q15

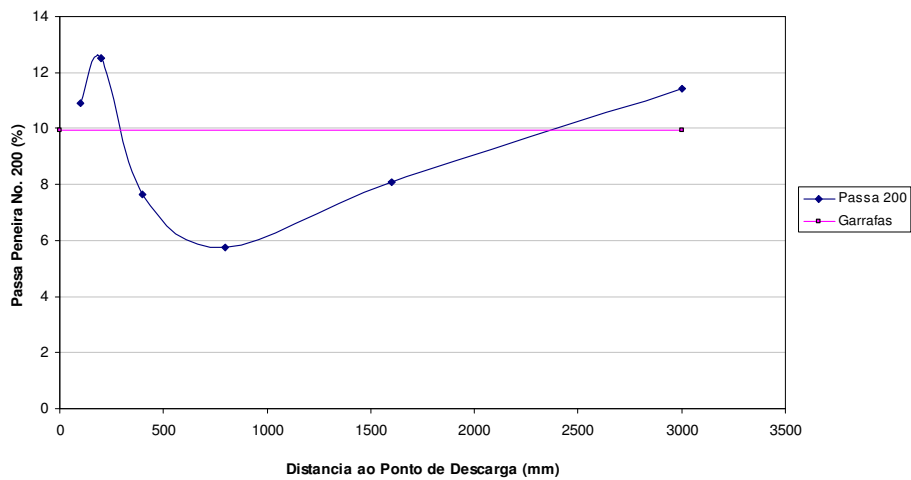




(a) Curvas granulométricas das amostras ao longo da praia

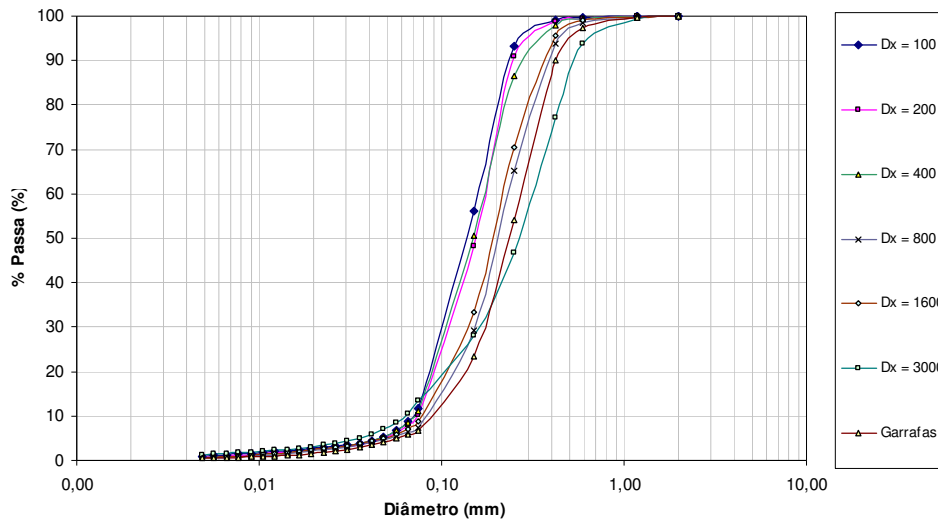


(b) Variação do diâmetro  $D_{90}$ , do diâmetro médio  $D_{50}$  e do diâmetro efetivo  $D_{10}$

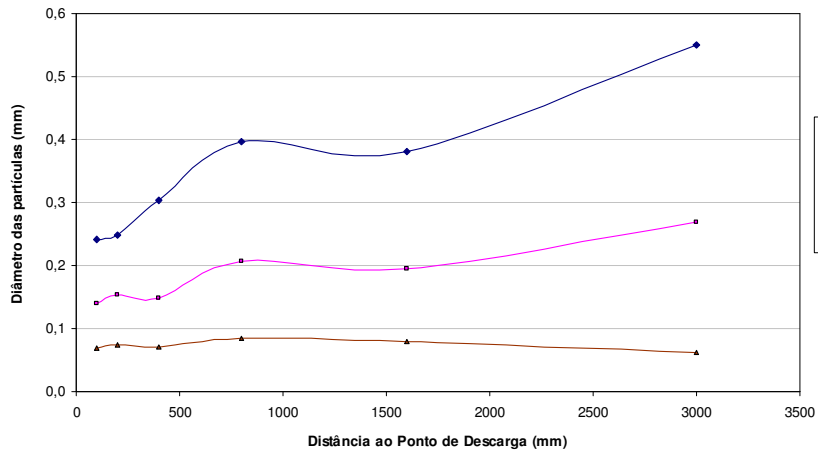


(c) Variação da porcentagem do passa na peneira No. 200 (<0,074 mm)

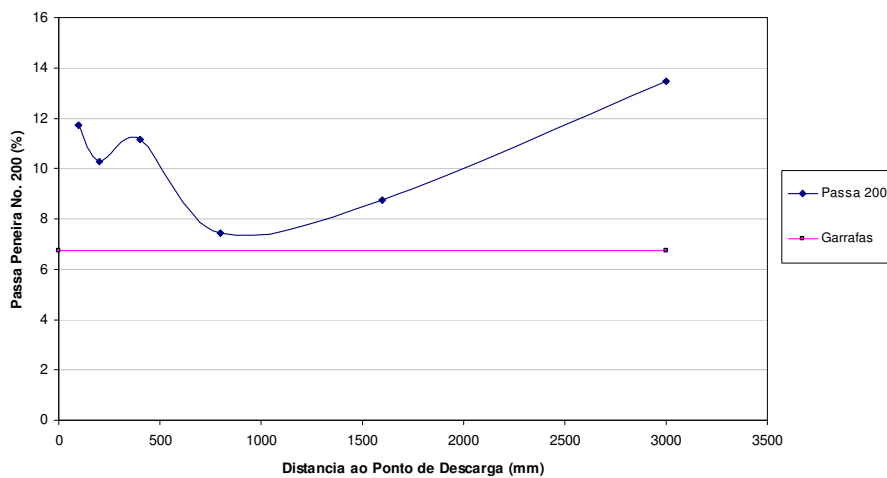
Figura G.2. Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro ciclonado (*underflow*) – Ensaio Au Cc-C15Q15



(a) Curvas granulométricas das amostras ao longo da praia



(b) Variação do diâmetro  $D_{90}$ , do diâmetro médio  $D_{50}$  e do diâmetro efetivo  $D_{10}$



(c) Variação da porcentagem do passa na peneira No. 200 (<0,074 mm)

Figura G.3. Análise granulométrica das amostras tomadas dos ensaios realizados no ESDH no material de rejeito de minério de ouro ciclonado (*underflow*) – Ensaio Au Cc-C25Q15

# **APÊNDICE H**

**REGISTRO FOTOGRÁFICO DOS ENSAIOS E PROCEDIMENTOS  
REALIZADOS**



Figura H.1 – Visão geral do Equipamento de Simulação de Deposição Hidráulica



Figura H.2 – Camada inicial de uniformização e nivelção do sistema de distribuição do fluxo no canal



Figura H.3 – Sistema de armazenamento e mistura da lama



Figura H.4 – Estocagem do material de rejeito de minério de ouro em campo





Figura H.5 – Estocagem do material rejeito de minério de ouro no laboratório da UnB



Figura H.6 – Pesagem do material de rejeito em sacos de 15kg para o controle inicial da concentração antes da realização do ensaio de deposição hidráulica



Figura H.7 – Execução do ensaio de deposição hidráulica



Figura H.8 – Controle da vazão durante a realização do ensaio de deposição hidráulica



Figura H.9 – Detalhe da conformação final da praia de deposição



Figura H.10 – Final do ensaio, conformação da parte inicial da praia e controle da altura da crista





Figura H.11 – Final do ensaio, lama depositada ao final do canal de deposição hidráulica



Figura H.12 – Coleta de amostras indeformadas ao longo da praia para caracterização

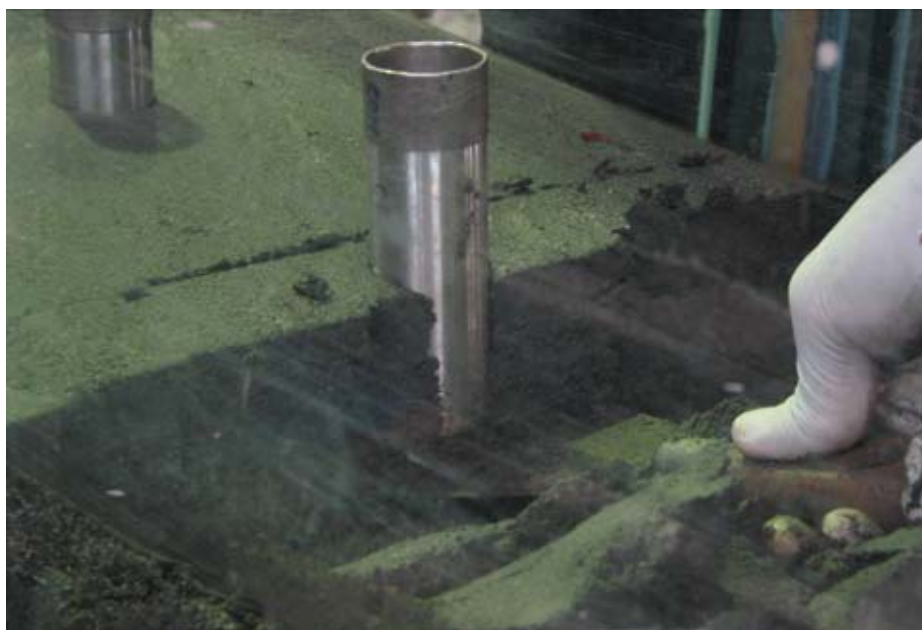


Figura H.13 – Coleta de amostras deformadas ao longo da praia para caracterização



Figura H.14 – Amostras indeformadas e deformadas para caracterização em laboratório



Figura H.15 – Determinação da massa úmida e das dimensões das amostras indeformadas