



COMPORTAMENTO AMBIENTAL E GEOTÉCNICO DA DISPOSIÇÃO DE SEDIMENTO DE DRAGAGEM EM SISTEMA GEOTÊXTIL FECHADO

Jonio Ferreira de Souza

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientadores: Márcio de Souza Soares de Almeida
Mário Vicente Riccio Filho

Rio de Janeiro
Outubro de 2018

COMPORTAMENTO AMBIENTAL E GEOTÉCNICO DA DISPOSIÇÃO DE
SEDIMENTO DE DRAGAGEM EM SISTEMA DE GEOTÊXTIL FECHADO

Jonio Ferreira de Souza

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof. Márcio de Souza Soares de Almeida, Ph.D.

Prof. Mário Vicente Riccio Filho, D.Sc.

Prof. Cláudio Fernando Mahler, Ph.D.

Prof. Ricardo Erthal Santelli, Ph.D.

Prof. Márcia Marques Gomes, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

OUTUBRO DE 2018

Souza, Jonio Ferreira de

Comportamento Ambiental e Geotécnico da Disposição de Sedimento de Dragagem em Sistema Geotêxtil Fechado / Jonio Ferreira de Souza. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XXXIII, 261 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Márcio de Souza Soares de Almeida,
Mário Vicente Riccio Filho

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 238-249.

1. Sistema Geotêxtil Fechado. 2. Sedimentos de dragagem. 3. Complexo lagunar de Jacarepaguá. 4. desaguamento de material dragado. I. Almeida, Márcio de Souza Soares de *et. al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

Dedico este trabalho ao meu irmão, **Thiers Renato**.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho contou com importantes apoios e incentivos pelos quais agradeço.

Ao orientador Márcio de Souza Soares de Almeida e co-orientador Mário Vicente Riccio Filho pela dedicação e paciência na orientação;

Aos professores do programa de pós graduação em engenharia civil da COPPE e UFRJ por compartilharem vasto conhecimento. Destaco a Professora Maria Claudia Barbosa pelo brilhante ensinamento na remediação de solos contaminados e por seus trabalhos de pesquisa que ampliaram minha visão ambiental e geotécnica dos sedimentos estudados. Estendo o agradecimento aos docentes de outros programas e instituições que contribuíram diretamente no desenvolvimento desse estudo.

À equipe da conceituada empresa Huesker, pela parceria com o fornecimento dos geossintéticos, polímeros e por todo o conhecimento repassado através do atencioso André Estevão da Silva e do consultor mentor José Carlos Vertemati.

Aos técnicos dos laboratórios, onde os diversos ensaios geotécnicos e ambientais foram realizados, pelo primor nos resultados e pelas discussões enriquecedoras. Dentre os laboratórios utilizados, agradeço:

- Aos laboratórios da geotecnia, um lar, onde a competente equipe técnica-administrativa formada por Serginho, Carlinhos, Luizão, Maria da Gloria, Maiara, Mariluce, Alice, Tatiane, Salviano, Toninho, Márcia e outros fazem a ciência acontecer.
- Ao Laboratório de Engenharia do Meio Ambiente (LEMA) com sua carinhosa e competente equipe formada pela Maria Cristina, Cida, Darlise e Eder que abraçaram o projeto de pesquisa e se envolveram nos testes com polímeros e análises físico-química das lamas e percolados.
- Ao Laboratório de Dinâmica de Sedimentos Coesivos (LDSC), capitaneado pelo professor Marcos Gallo, que trouxe grande contribuição com gentil fornecimento de equipamentos e acompanhamento da coleta de campo, permitindo ainda em parceria com Raphaela Paiva e Gabriela Burasch o uso do granulômetro a laser e discussão dos métodos para caracterização do sedimento.

- Ao Núcleo de Catálise (NuCat) da Engenharia Química, onde Adão Gonçalves instruiu na preparação e realização dos ensaios de fluorescência de Raio X;
- Ao Laboratório de Catálise e Energia Sustentável (LACES) do Instituto de química em que a professora Cristiane Cardoso e Thacyla Campos efetuaram a Difração de Raio X na amostra de sedimento e nas tortas;
- Ao Laboratório de Desenvolvimento Analítico (LaDA) do Instituto de Química, onde o professor Ricardo Santelli e Aline Freire elucidaram os questionamentos sobre elementos traço e efetuaram análises nos percolados e lamas;
- Ao Laboratório de Engenharia Sanitária (LES) da UERJ que auxiliou com as análises de Carbono Orgânico Total sob a instrução da professora Daniele Bila e acompanhamento do técnico Sidnei Gomes;
- Ao Grupo de Tecnologia e Engenharia de Petróleo (GTEP) da PUC-RIO que participou na condução dos ensaios de viscosidade da lama com a supervisão do professor Sergio Fontoura e acompanhamento do técnico Victor Meléndez;
- Ao Laboratório de caracterização da Embrapa solos, onde parte dos ensaios de capacidade de troca catiônica foram conduzidos na supervisão de Silvio Tavares;
- Ao Laboratório de Engenharia Metalúrgica e Materiais do Ifes Campus Vitória-ES, onde o colega Ricardo Boldrini prontamente contribuiu com a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e a Análise de Energia Dispersiva (EDS).

À equipe do Consórcio Complexo Lagunar, como o atuante Yoshiaki Yamabe, Bruno Pitta, Marcio Rodrigues, Antonio Calle e outros obreiros que trouxeram dados e desafios de um caso real para pesquisa, além das experiências com a dragagem do Fundão.

Ao Inea, pelas informações da rede de monitoramento da água e sedimento das lagoas do CLJ e pelo acesso ao processo de licenciamento ambiental da atividade de dragagem.

À equipe que contribuiu diretamente na preparação e operação do experimento, como o formidável e habilidoso Cid Diegues, Sr Gusmão, José Cobra Neto, Gilberto Martins, e os meus empenhados estagiários Léa, Fabrício e Gabriel.

Ao CNPQ e aos Ifes pelo incentivo à pesquisa.

Aos colegas, que estiveram ao meu lado nesta fase, pelo companheirismo, força e apoio, tanto técnico, quanto psicológico. Vários parceiros são enquadrados nesta categoria. O estudo me trouxe novos amigos como o irmão Thiago, Janssen, Alcino, Jana, Diego, Marcela, Claudia, Roselene, Pablo, Mário Nacinovic, Cassiano, Rosa, Daniele, Fabrícia, Flaviano, e muitos outros tão fundamentais quanto o fiel Rafael Gundim.

À todas aquelas pessoas que contribuíram esclarecendo uma simples dúvida, inclusive pelo essencial whatsapp, ou que disseram palavras de estímulo para continuar firme e lograr êxito em meu propósito no Rio de Janeiro. Sintam-se todos agradecidos.

Por fim, agradeço gigantescamente a minha preciosa família: pais, irmãos, cunhada, sobrinhos, esposa e amado filho, pela energia e segurança que me fazem seguir adiante em minhas empreitadas.

“A persistência é o menor caminho ao êxito”

(Charles Chaplin)

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

COMPORTAMENTO AMBIENTAL E GEOTÉCNICO DA DISPOSIÇÃO DE SEDIMENTO DE DRAGAGEM EM SISTEMA GEOTÊXTIL FECHADO

Jonio Ferreira de Souza

Outubro/2018

Orientadores: Márcio de Souza Soares de Almeida

Mário Vicente Riccio Filho

Programa: Engenharia Civil

O trabalho apresenta a caracterização geotécnica e ambiental de sedimentos superficiais e águas provenientes da lagoa da Tijuca que pertencente ao complexo lagunar de Jacarepaguá /RJ e necessita de dragagem. Neste contexto, produziu-se uma lama de dragagem representativa com teor de sólidos de 10% e efetuou-se o condicionamento com polímero para experimentação laboratorial em 09 mini Sistemas Geotêxteis Fechados. Os processos de enchimento manual e bombeado são discutidos à luz de parâmetros ambientais dos percolados gerados, bem como dos parâmetros ambientais e geotécnicos das tortas retidas. Constatou-se que o sistema geotêxtil fechado apresentou uma eficiência de retenção de sólidos suspensos maior que 98,7%. Os teores dos nutrientes, Fósforo e nitrogênio, presentes no percolado foram reduzidos em 94,1 e 55,1%, respectivamente. Parâmetros como pH, Eh e CEE aumentaram com relação à lama de origem, mas ficaram próximos às características da água da lagoa. Com relação às tortas retidas, observou-se uma resistência ao cisalhamento na ordem de 16,0 kPa após 40 dias, quando o teor de sólidos se encontrava superior a 40%, o que corresponde a uma umidade média de 150%. Correlações com graus aceitáveis de confiabilidade foram obtidas e podem ser utilizadas na concepção de anteprojetos com a tecnologia de sistemas geotêxteis fechados.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

ENVIRONMENTAL AND GEOTECHNICAL BEHAVIOR OF DREDGING
SEDIMENT DISPOSAL IN CLOSED GEOTEXTILE SYSTEM

Jonio Ferreira de Souza

October/2018

Advisors: Márcio de Souza Soares de Almeida

Mário Vicente Riccio Filho

Department: Civil Engineering

This study presents a geotechnical and environmental characterization of sediments and waters from the Tijuca lagoon that needs to be dredged and belongs to the Jacarepaguá lagoon complex located in the coastal zone of Rio de Janeiro. Thereafter, a dredging mud with a solids content of 10% was produced and the polymer conditioning was performed for the laboratory experimentation in 09 mini Closed Geotextile Systems. The processes of manual and pumped filling are discussed through environmental and geotechnical parameters of the percolates generated and the sediment cakes retained. It was found that the closed geotextile system has a suspended solids retention efficiency greater than 98.7%. The nutrient, phosphorus and nitrogen, contents of the percolate were reduced by 94.1% and 55.1%, respectively. Parameters such as pH, Eh and CEE increased with respect to the original mud, but are close to the characteristics of the lagoon water. With respect to the sediment cakes retained, a shear strength of 16.0 kPa was observed after 40 days of the last filling cycle, when the solids content was higher than 40%, corresponding to an approximate moisture of 150%. Several correlations with acceptable levels of reliability have been obtained and can be used in the design of preliminary projects with closed geotextile systems technology.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. RELEVÂNCIA DO TEMA _____	1
1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA _____	4
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO _____	5
2. DRAGAGEM E DESTINAÇÃO DOS SEDIMENTOS.....	7
2.1. CONCEITO E HISTÓRICO _____	7
2.2. OBJETIVOS DA DRAGAGEM _____	8
2.3. TIPOS DE DRAGAGEM _____	9
2.4. ATIVIDADE DE DRAGAGEM _____	10
2.5. EQUIPAMENTOS DE DRAGAGEM _____	12
2.5.1. Equipamentos Mecânicos	12
2.5.2. Equipamentos Hidráulicos	13
2.5.3. Equipamentos Pneumáticos.....	14
2.6. DESTINAÇÃO DO SEDIMENTO DRAGADO _____	15
2.6.1. Disposição aquática	15
2.6.2. Disposição terrestre	17
2.6.3. Uso benéfico	19
2.6.4. Tratamento dos sedimentos dragados	20
2.7. NORMATIVAS PARA DESTINAÇÃO DO MATERIAL DRAGADO __	21
2.7.1. Convenções Internacionais	21
2.7.2. Normativas Americanas.....	23
2.7.3. Normativas Canadenses	23
2.7.4. Normativas Brasileiras.....	24
2.7.5. Valores orientadores e classificação do sedimento por país	32
2.8. ESTUDOS AMBIENTAIS PARA ATIVIDADE DE DRAGAGEM _____	34
2.8.1. Elementos do diagnóstico ambiental.....	35
2.8.2. Possíveis impactos ambientais	35
2.8.3. Relação de medidas de controle e mitigação dos impactos.....	36
2.8.4. Listagem de programas de acompanhamento e monitoramento	37
2.9. CONCLUSÕES PARCIAIS _____	37

3.	DISPOSIÇÃO CONFINADA EM SISTEMA GEOTÊXTIL FECHADO	38
3.1.	CONFINAMENTO EM SISTEMA GEOTÊXTIL FECHADO _____	40
3.1.1.	Tubos Geotêxteis.....	41
3.1.2.	Containers Geotêxteis	41
3.1.3.	Bolsas Geotêxteis	42
3.1.4.	Matrizes Geotêxteis	42
3.2.	PROPRIEDADES PARA DIMENSIONAMENTO DO SGF _____	42
3.2.1.	Propriedades do geotêxtil.....	43
3.2.2.	Propriedades do material de enchimento.....	46
3.2.3.	Solicitações hidráulicas do sistema	48
3.2.3.1.	Critério de Permeabilidade	48
3.2.3.2.	Critério de Retenção	50
3.2.3.3.	Critério Anti-entupimento	51
3.2.3.4.	Critério de Durabilidade	52
3.2.4.	Solicitações mecânicas do sistema em Tubo Geotêxtil	52
3.2.4.1.	Análise da Forma.....	53
3.2.4.2.	Análise da resistência a tração.....	55
3.2.4.3.	Solicitações mecânicas com sobreposição de tubos geotêxteis.....	57
3.3.	PROCESSO DE DISPOSIÇÃO CONFINADA EM TUBO GEOTÊXTIL	58
3.3.1.	Instalações do Sistema Geotêxtil Fechado (SGF)	58
3.3.1.1.	Preparação da área e posicionamento do tubo geotêxtil.....	59
3.3.1.2.	Condicionamento da lama com polímero.....	60
3.3.1.3.	Estrutura e forma de enchimento.....	61
3.3.1.4.	Dispositivos de coleta e destinação do efluente	64
3.3.1.5.	Critérios de encerramento.....	64
3.3.2.	Ensaio de verificação preliminar de Sistema Geotêxtil Fechado....	65
3.3.2.1.	Teste de desaguamento rápido e ensaio de mini funil.....	65
3.3.2.2.	Ensaio de bolsa suspensa.....	66
3.3.2.3.	Ensaio de bolsa de pequenas dimensões (mini-geoforma).....	67
3.3.2.4.	Teste de filtração com pressão	70
3.3.3.	Índices de avaliação de desempenho do processo.....	71
3.4.	CONCLUSÕES PARCIAIS_____	72

4.	DESCRIÇÃO DO COMPLEXO LAGUNAR DE JACAREPAGUÁ.	73
4.1.	LOCALIZAÇÃO E HIDROGRAFIA	73
4.1.1.	Características geométricas das lagoas.....	75
4.1.2.	Aporte hídrico das lagoas	77
4.1.3.	Enquadramento das águas.....	79
4.2.	USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA BACIA HIDROGRÁFICA DE JACAREPAGUÁ	79
4.2.1.	Impactos hídricos da ocupação antrópica	80
4.2.2.	Histórico do Saneamento na região	81
4.3.	HISTÓRICO DE DRAGAGEM NA REGIÃO	83
4.4.	CONCLUSÕES PARCIAIS	92
5.	MATERIAIS E MÉTODOS	93
5.1.	COLETA E PRESERVAÇÃO DE AMOSTRAS	93
5.1.1.	Definição dos pontos de coleta.....	93
5.1.2.	Procedimento de coleta e preservação das amostras.....	94
5.2.	PARÂMETROS GEOTÉCNICOS E MÉTODOS ANALÍTICOS	97
5.2.1.	Massas, pesos e densidades específicas	97
5.2.2.	Teor de umidade	98
5.2.3.	Granulometria	99
5.2.4.	Limites de Atterberg	102
5.2.5.	Classificação do sedimento	102
5.2.6.	Caracterização mineralógica	103
5.2.7.	Teor de Matéria Orgânica (TMO).....	105
5.2.8.	Resistência ao cisalhamento.....	107
5.2.9.	Parâmetros da compressão oedométrica.....	108
5.3.	PARÂMETROS AMBIENTAIS E MÉTODOS ANALÍTICOS	113
5.3.1.	Capacidade de Troca Catiônica (CTC)	113
5.3.2.	Potencial Hidrogeniônico (pH).....	114
5.3.3.	Potencial Redox (Eh).....	114
5.3.4.	Condutividade elétrica específica (CEE).....	114
5.3.5.	Carbono Orgânico Total (COT).....	115
5.3.6.	Série Nitrogenada	116
5.3.7.	Fósforo Total.....	117

5.3.8.	Oxigênio Dissolvido (OD)	117
5.3.9.	Temperatura	118
5.3.10.	Turbidez	118
5.3.11.	Sólidos Totais e Teor de Sólidos	119
5.3.12.	Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	120
5.3.13.	Demanda Química de Oxigênio (DQO)	120
5.3.14.	Metais Traço	121
5.4.	MATERIAL GEOTÊXTIL UTILIZADO _____	124
5.5.	PARÂMETROS DE ANÁLISES DO SEDIMENTO E DA ÁGUA _____	125
5.6.	CRITÉRIOS DE PREPARO DA LAMA DE DRAGAGEM _____	126
5.6.1.	Forma de preparo da lama	126
5.6.2.	Preceitos reológicos da lama	127
5.6.2.1.	Ensaio de viscosidade da lama	129
5.6.3.	Testes para condicionamento da lama	129
5.6.3.1.	Programa de ensaios de mini funil	131
5.6.3.2.	Programa de ensaios do <i>Jar test</i>	134
5.6.3.3.	Determinação da vazão de solução polimérica ao sistema.....	136
5.6.4.	Elementos dimensionais para mistura da lama com polímero	136
5.6.4.1.	Elementos dimensionais para processo mecânico de mistura	137
5.6.4.2.	Elementos dimensionais para processo hidráulico de mistura	140
5.7.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL EM BOLSA DE PEQUENA DIMENSÃO – MINI SISTEMA GEOTÊXTIL FECHADO (SGF) _____	141
5.7.1.	Preparação do fluido (lama) para enchimento do SGF	141
5.7.2.	Instalação e operação do experimento em SGF	142
5.8.	MONITORAMENTO E COLETA DE DADOS DO EXPERIMENTO _____	146
5.8.1.	Parâmetros de análises da mistura afluyente (lama)	146
5.8.2.	Parâmetros de análises do efluente (percolado)	146
5.8.3.	Parâmetros de análises da torta retida	148
5.9.	CONCLUSÕES PARCIAIS _____	149

6.	CARACTERIZAÇÕES DOS MATERIAIS CONSTITUINTES DA LAMA DE DRAGAGEM	150
6.1.	CARACTERIZAÇÃO DO SEDIMENTO DA LAGOA DA TIJUCA ____	150
6.1.1.	Parâmetros geotécnicos.....	150
6.1.2.	Nutrientes e contaminantes inorgânicos.....	155
6.1.3.	Parâmetros Complementares	158
6.2.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA DA LAGOA DA TIJUCA _____	164
6.2.1.	Parâmetros medidos diretamente em campo	164
6.2.2.	Nutrientes e carga orgânica da água da lagoa da Tijuca.....	166
6.2.3.	Sólidos e Turbidez da água da lagoa da Tijuca	168
6.2.4.	Metais traço da água da lagoa da Tijuca.....	168
6.3.	CONCLUSÕES PARCIAIS _____	169
7.	PRODUÇÃO E CONDICIONAMENTO DA LAMA DE DRAGAGEM.....	170
7.1.	PROPORÇÕES DE SEDIMENTO E ÁGUA NA PRODUÇÃO DA LAMA	170
7.2.	DOSAGEM DO POLÍMERO NO CONDICIONAMENTO DA LAMA _	172
7.2.1.	Resultados dos ensaios de cone/mini funil – Primeira etapa	172
7.2.2.	Resultados dos Ensaios de cone/mini funil – Segunda etapa.....	174
7.2.3.	Resultados dos testes de refinamento finais com <i>Jar test</i>	176
7.3.	PROPRIEDADES REOLÓGICAS DA LAMA PRODUZIDA _____	178
7.4.	MISTURA DA SOLUÇÃO POLIMÉRICA COM A LAMA PRODUZIDA	180
7.4.1.	Parâmetros de dimensionamento para mistura mecânica.....	181
7.4.2.	Parâmetros de dimensionamento para mistura hidráulica	183
7.5.	CONCLUSÕES PARCIAIS _____	185
8.	COMPORTAMENTO DA DISPOSIÇÃO DE SEDIMENTO DE DRAGAGEM EM SISTEMA GEOTEXTIL FECHADO	186
8.1.	COMPORTAMENTO MECÂNICO DO SISTEMA GEOTÊXTIL FECHADO _	186
8.1.1.	Atributos de forma e resistência do sistema.....	186
8.1.2.	Critérios mecânicos do processo de enchimento e desaguamento .	188
8.2.	COMPORTAMENTO AMBIENTAL DO PERCOLADO GERADO ____	191
8.2.1.	Sólidos Totais e Sólidos Suspensos.....	191
8.2.2.	Turbidez	194
8.2.3.	Nutrientes (Fósforo e Nitrogênio)	196

8.2.4.	Carga orgânica (DBO e DQO)	200
8.2.5.	Contaminantes inorgânicos (Elementos traço)	202
8.2.6.	Parâmetros complementares (CEE, pH, Eh)	202
8.3.	COMPORTAMENTO AMBIENTAL DA TORTA DE SEDIMENTO RETIDA _____	206
8.3.1.	Nutrientes (Fósforo e Nitrogênio) e Carbono orgânico total.....	206
8.3.2.	Contaminantes inorgânicos (Elementos traço)	209
8.3.3.	Parâmetros complementares (CEE, pH, Eh e CTC).....	210
8.3.4.	Classificação da torta retida segundo a norma de resíduos sólidos	214
8.4.	COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DA TORTA DE SEDIMENTO RETIDA _____	216
8.4.1.	Granulometria, Densidade dos grãos e Limites de Atterberg	216
8.4.2.	Teor de sólidos em peso e eficiência do desaguamento	220
8.4.3.	Resistência ao cisalhamento em função do tempo e da umidade ...	221
8.4.4.	Parâmetros de compressibilidade e índices físicos	223
8.5.	CONCLUSÕES PARCIAIS _____	229
8.5.1.	Dos percolados gerados	229
8.5.2.	Das tortas retidas	230
9.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	233
9.1.	CONCLUSÕES GERAIS _____	233
9.2.	RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS _____	237
	REFERÊNCIAS	238
	ANEXOS	250

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Forma de disposição aquática irrestrita dispersiva (USACE, 2004)	15
Figura 2.2 - Forma de disposição aquática irrestrita não dispersiva (USACE, 2004)....	16
Figura 3.1 - Perfil longitudinal e transversal típicos de um tubo geotêxtil (Lawson, 2008)	41
Figura 3.2 – Tensão no geotêxtil em etapas de instalação aquática do sistema fechado (Lawson, 2008).....	46
Figura 3.3 - Zonas de deposição do material durante o bombeamento (Castro, 2005)..	48
Figura 3.4 - Modelo e ábaco para dimensionamento de tubo geotêxtil (Liu, Goh e Silvester, 1990).....	55
Figura 3.5 - Modelo Kazimierowicz de verificação da tração no sistema (Kazimierowicz, 1994).....	56
Figura 3.6 – Modelo Leshchinsky para tração do sistema e detalhes de tensões (Leshchinsky, 1996)	56
Figura 3.7 - Dimensionamento de tubos geotêxteis sobrepostos na mesma direção (adaptado de Martins e Vidal, 2006)	57
Figura 3.8 - Dimensionamento de tubos geotêxteis sobrepostos na direção contrária (adaptado de Martins e Vidal, 2006)	58
Figura 3.9 - Seção transversal do tubo sobre base de recebimento em terra (próprio autor)	59
Figura 3.10 - Esquema de condicionamento da lama com mistura hidráulica para floculação em linha (próprio autor)	61
Figura 3.11 - Enchimento cíclico e a variação de volume ao longo do tempo (Lawson, 2006).....	63

Figura 3.12 - Formas de disposição do sistema fechado geotêxtil com sedimento dragado.	65
Figura 3.13 - Registros fotográficos de Teste de desaguamento rápido (RDT) e ensaios de mini funil: a) equipamento do ensaio RDT; b) enchimento de lama no RDT; c) enchimento de lama no mini funil (adaptado de TenCate, 2007 e Tominaga, 2010)....	66
Figura 3.14 - Registros fotográficos de ensaios de bolsa suspensa: a) aparato de suporte, b) condicionamento da lama, c) enchimento da bolsa suspensa, d) abertura da bolsa suspensa (adaptado de Martins, 2006 e Mastin, Leinster e Salley, 2008).	67
Figura 3.15 – Registros fotográficos de ensaios de bolsa de pequena dimensão: a) estrutura do ensaio, b) materiais utilizados, c) condicionamento da lama, d) enchimento manual, e) bolsa cheia, f) bolsa vazia, g) estrutura com tripé (adaptado de Yee et al., 2011; TenCate, 2010 e Tominaga, 2010)	69
Figura 3.16 – Aparato do teste de filtração com pressão (adaptado de Khachan et al., 2014).....	70
Figura 4.1 - Divisão das nove bacias hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro (Resolução CERHI-RJ nº 107/2013 – COPPETEC, 2014).....	73
Figura 4.2 - Mapa com destaque da sub-bacia hidrográfica de Jacarepaguá na Bacia da Baía da Guanabara. (Comitê de bacia da Baía da Guanabara, 2016).....	74
Figura 4.3 - Mapa das treze regiões hidrográficas da Sub-bacia de Jacarepaguá (FREITAS, 2009)	75
Figura 4.4 - Mapa de Localização das lagoas do Complexo Lagunar de Jacarepaguá (MASTERPLAN, 2013).....	76
Figura 4.5 - Localização estimada das Unidades de Tratamento de Rios (UTR's) (PROJCONSULT, 2011).....	83
Figura 4.6 - Esquema e características das áreas de disposição da dragagem iniciada em 1996 (adaptado de Paula, 1999)	85

Figura 4.7 - Local de disposição dos sedimentos dragados na lagoa da Tijuca de 2004 a 2006: (a) Trajeto do duto transportador do sedimento dragado para área de disposição (b) Projeto das células previstas na área de disposição (SMAC, 1998 apud Lerner, 2000).	86
Figura 4.8 - Áreas previstas no RAS (2013) para disposição dos sedimentos dragados. (MASTERPLAN, 2013).....	90
Figura 4.9 - Áreas previstas no EIA/RIMA (2015) para disposição do sedimento dragado (MASTERPLAN, 2015).....	90
Figura 5.1- Vista da lagoa da Tijuca com indicação da região de coleta do material (ilustrativo)	94
Figura 5.2 - Equipamentos de coleta do sedimento (Trado manual e pegador Ekman-Birge).....	95
Figura 5.3 - Forma de acondicionamento do material coletado (sacolas plásticas, bombonas e recipientes para laboratórios de análises).....	96
Figura 5.4- Características dos cilindros para análise da massa específica aparente natural	97
Figura 5.5 - Ensaio de determinação da massa específica dos grãos com picnômetros. 98	
Figura 5.6 - Peneiramento das amostras na peneira nº 10 (# 2mm) e separação de conchas	100
Figura 5.7 – Gráfico de decaimento médio da umidade na secagem ao ar, com registro da temperatura ambiente para preparo de amostra do ensaio granulométrico via úmida. 101	
Figura 5.8 – Decaimento da umidade do sedimento durante o período de secagem ao ar	101
Figura 5.9 – Equipamento de moldagem das pastilhas e Espectrômetro por fluorescência de Raio-X, marca Rigaku, modelo RIX3100.	104
Figura 5.10 – Equipamento de metalização da amostra e Microscópio Eletrônico de Varredura.....	105

Figura 5.11 - Equipamentos e processos de determinação da matéria orgânica do sedimento. A) mufla para queima da M.O; B) preparo das amostras para método do dicromato; C) centrífuga para separação da solução de lavagem do sedimento; D) tubetes com segregação do sedimento do fluido.....	106
Figura 5.12 – Identificação de pontos de amostragem no sistema geotêxtil fechado e Detalhe do equipamento de mini palheta.	108
Figura 5.13 – Cravação de anel cilíndrico para obtenção do corpo de prova e Prensas de adensamento do tipo Bishop do laboratório de geotecnia da Coppe-UFRJ	109
Figura 5.14 – Espectrômetro de absorção atômica com chama Perkin-Elmer Modelo AAnalyst 300 do laboratório de química da geotecnia-UFRJ.....	113
Figura 5.15 - Curva de calibração do condutivímetro (Castiglia, 2006).....	115
Figura 5.16 – Classificação e distribuição dos sólidos em função do tamanho das partículas (Von Sperling, 2005).....	119
Figura 5.17 – Forno de micro-ondas da marca Berghof e Espectrômetro de Emissão Óptica com Fonte de Plasma Indutivamente Acoplado (ICP OES) da marca Horiba Jobin Yvon	123
Figura 5.18 – Curvas de fluxo de fluidos newtoniano e não newtonianos (Machado, 2002)	128
Figura 5.19 – Esquema da dupla camada elétrica em uma partícula coloidal (PAVANELLI, 2001)	130
Figura 5.20- Registro fotográfico do ensaio de mini funil. A) funil geotêxtil e cone Imhof; B) Lama de dragagem natural e flocluada; C) tortas retidas no funil geotêxtil; e D) percolados gerados.	133
Figura 5.21- Esquema do ensaio de <i>Jar Test</i> com ensaio de mini funil (cone).....	135

Figura 5.22 - Etapas do ensaio piloto de <i>Jar test</i> seguido pela filtração em mini funil. A) lama natural em jarros; B) lama após mistura de dosagens dos polímeros em <i>Jar test</i> ; C) Aparato de filtração no mini funil (cone).	135
Figura 5.23 – Aparato em estrutura metálica e elementos constitutivos utilizados para desaguamento em mini-SGF com enchimento manual.	143
Figura 5.24 – Composição do sistema bombeado de enchimento de mini-SGF.....	144
Figura 5.25 – Estrutura dos mini-SGF com enchimento manual e com enchimento bombeado	145
Figura 5.26 – Aparelhos de aferição do pH, CEE, Eh e temperatura do percolado no laboratório de química da geotecnia ambiental da Coppe/UFRJ	147
Figura 5.27 – Abertura da bolsa de pequena dimensão e amostra indeformada cilíndrica para ensaio oedométrico.	148
Figura 6.1 - Curvas granulométricas de amostras de sedimento superficial da Lagoa da Tijuca.....	151
Figura 6.2 - Percentuais granulométricos do sedimento na escala Wentworth.....	151
Figura 6.3 - Diagrama de umidades e teor de sólidos em peso, com indicação do sedimento a ser dragado e da lama produzida	155
Figura 6.4 - Concentrações de cobre no sedimento de superfície (< 1m) e de fundo em Estações de Coleta (EC) e Unidade de Caracterização de Dragagem (UCD) da Lagoa da Tijuca (elaborado a partir de MASTERPLAN, 2015).....	157
Figura 6.5 - Difratoograma com detecção de picos de argilominerais no sedimento da estação coleta 12.....	163
Figura 6.6 - Multiparâmetros para monitoramento da água nas duas campanhas de coleta	164
Figura 6.7 - Salinidade na Lagoa da Tijuca (MASTERPLAN, 2015)	165

Figura 6.8 - Oxigênio Dissolvido na Lagoa da Tijuca (elaborado a partir de INEA, 2015)	166
Figura 7.1 - Vazão média de desaguamento da Lama de dragagem em geotêxtil tecido com relação a dosagem e o tipo do polímero a solução de 0,1%.	173
Figura 7.2 - Turbidez do percolado com relação a dosagem e o tipo do polímero utilizado em solução de 1%.	173
Figura 7.3 - Vazão média de desaguamento da Lama de dragagem em geotêxtil tecido com relação a dosagem, tipo e solução do polímero.	175
Figura 7.4 - Turbidez do percolado com relação a dosagem e o tipo do polímero para soluções de 0,1%, 0,5% e 1.0%.	176
Figura 7.5 - Vazão de desaguamento (A) e turbidez do percolado (B) no processo de <i>Jar</i> <i>test</i> seguido do mini funil.	177
Figura 7.6 - Curvas de fluxo das lamas produzidas com diferentes teores de sólidos em peso.....	178
Figura 7.7 - Curvas de viscosidade da lama produzida com diferentes teores de sólidos em peso.....	179
Figura 7.8 - Valor de potência instalada para agitação (rápida e lenta) da lama em função do volume e de condições apuradas no <i>Jar test</i>	182
Figura 7.9 - Dimensões de parâmetros do tanque e do impelidor tipo pá em função do volume de lama e de condições apuradas no <i>Jar test</i>	183
Figura 8.1 – Etapas do primeiro ciclo de enchimento e desaguamento do SGF: a) lama em enchimento; b) lama em desaguamento e sedimentação; c) torta retida.	187
Figura 8.2 – Peso da torta retida em cada ciclo de enchimento manual (SGF 04).....	188
Figura 8.3 – Peso da torta retida em cada ciclo de enchimento bombeado (SGF 08)..	189

Figura 8.4 – Alturas das tortas retidas com enchimento manual e bombeado por ciclo	190
Figura 8.5 - Concentração de sólidos totais nas lamas e nos percolados finais de cada ciclo de desaguamento, com a eficiência de remoção correspondente por SGF.....	191
Figura 8.6 – Análise de variância da concentração de sólidos totais a) nas lamas e b) nos percolados de cada SGF, pela comparação de Tukey.	192
Figura 8.7 - Concentração de sólidos suspensos nas lamas e nos percolados finais de cada ciclo de desaguamento, com a eficiência de remoção correspondente por SGF.....	193
Figura 8.8 - Concentração de sólidos suspensos nos percolados finais de cada ciclo de desaguamento dos SGFs.....	193
Figura 8.9 - Turbidez nos percolados em vários instantes de cada ciclo de desaguamento dos SGFs.....	195
Figura 8.10 – Lama e sequência de percolados por ciclos de desaguamento.....	195
Figura 8.11 – Distribuição da concentração de Fósforo Total (P-total) nas amostras de Lama e de Percolado, para SGF com enchimento manual e com enchimento bombeado.	196
Figura 8.12 – Linhas de tendência da concentração de Fósforo Total (P-total) considerando os ciclos de desaguamento de cada SGF.....	197
Figura 8.13 – Processos e transformações do Nitrogênio a partir de Von Sperling, 2005.	198
Figura 8.14 – Distribuição da concentração de Nitrogênio Amoniacal nas amostras de Lama e de Percolado, para SGF com enchimento manual e com enchimento bombeado.	199
Figura 8.15 – Distribuição da concentração de Demanda Química de Oxigênio nas amostras de Lama e de Percolado, para SGF com enchimento manual e com enchimento bombeado.	200

Figura 8.16 – Distribuição da concentração de Demanda Bioquímica de Oxigênio nas amostras de Lama e de Percolado, para SGF com enchimento manual e com enchimento bombeado.	201
Figura 8.17 – Distribuição da condutividade elétrica específica nas amostras de Lama e de Percolado, para SGF com enchimento manual e com enchimento bombeado.	203
Figura 8.18 – Distribuição do potencial Hidrogeniônico (pH) nas amostras de Lama e de Percolado, para SGF com enchimento manual e com enchimento bombeado.	204
Figura 8.19 – Distribuição do potencial Redox (Eh) nas amostras de Lama e de Percolado, para SGF com enchimento manual e com enchimento bombeado.	205
Figura 8.20 – Fósforo total (P-total) das tortas retidas pelos SGFs e dos sedimentos a serem dragados.	206
Figura 8.21 – Nitrogênio Kjeldahl total (NTK) das tortas retidas pelos SGFs e dos sedimentos a serem dragados.	207
Figura 8.22 – Carbono Orgânico Total (COT) das tortas retidas pelos SGFs e dos sedimentos a serem dragados.	208
Figura 8.23 – Matéria Orgânica (M.O.) das tortas retidas pelos SGFs e dos sedimentos a serem dragados.	208
Figura 8.24 – Elementos traço (Pb, Cu, Ní, Zn) das tortas retidas pelos SGFs.	209
Figura 8.25 – Condutividade Elétrica Específica (CEE) das tortas retidas pelos SGFs e dos sedimentos a serem dragados.	211
Figura 8.26 – Potencial Hidrogeniônico (pH) das tortas retidas pelos SGFs e dos sedimentos a serem dragados.	211
Figura 8.27 – Potencial Redox (Eh) das tortas retidas pelos SGFs e dos sedimentos a serem dragados.	212
Figura 8.28 – Curvas granulométricas das tortas retidas nos SGFs de enchimento manual e bombeado, e o sedimento de composição da lama produzida.	217

Figura 8.29 – Densidade Relativa dos Grãos (Gs) das tortas retidas pelos SGFs e dos sedimentos a serem dragados.	218
Figura 8.30 – Índices de Plasticidade (IP) das tortas retidas pelos SGFs e dos sedimentos a serem dragados.	220
Figura 8.31 – Teor de Sólidos em peso (TSp) das tortas retidas pelos SGFs, da lama de dragagem produzida e as respectivas eficiências de desaguamento.....	221
Figura 8.32 – Resistência não drenada (S_u) e não amolgada das tortas retidas nos SGFs em função do tempo de desaguamento e linhas de tendências.....	222
Figura 8.33 – Resistência não drenada (S_u) das tortas retidas nos SGFs em função da umidade, com curvas de tendência máxima e mínimas.....	223
Figura 8.34 – Porcentagem de umidade gravimétrica, de saturação e de sólidos das tortas retidas em cada SGF, após 40 dias do último ciclo de enchimento.	224
Figura 8.35 – Coeficiente de adensamento vertical (C_v) das tortas retidas nos SGFs em função da tensão vertical, com destaque para a região das tensões de pré-adensamento.	225
Figura 8.36 – Curvas de compressão das tortas retidas nos SGFs em função do índice de vazios e da tensão vertical em escala logarítmica, para determinação de σ'_{vm} , C_c , C_e e CR	225
Figura 8.37 – Comparação dos pares (C_c , w) obtidos para as o estudo e correlação proposta por Almeida et al. (2008).....	226
Figura 8.38 – Correlação entre S_u/σ'_{vamp} e o índice de plasticidade (IP) das tortas de sedimentos retidas nos SGFs	227
Figura 8.39 – Curvas de compressão das tortas retidas nos SGFs em função da deformação específica vertical (E_v) e da tensão vertical em escala aritmética, para determinação de m_v e E_{oed}	227

Figura 8.40 – Módulo Oedométrico das tortas retidas nos SGFs por faixa de variação da tensão vertical..... 228

Figura 8.41 – Coeficiente de permeabilidade (k) das tortas retidas nos SGFs por faixa de variação da tensão vertical..... 228

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Características dos diferentes tipos de dragagem (elaborada a partir de Eisma, 2005).....	10
Tabela 2.2 - Etapas da atividade de dragagem e suas alternativas de realização (elaborado pelo próprio autor)	11
Tabela 2.3 - Dragas Mecânicas: Vantagens e desvantagens (elaborado a partir de Palermo et al., 2008).....	12
Tabela 2.4 - Dragas Hidráulicas: Vantagens e Desvantagens (elaborado a partir de Palermo et al., 2008).....	14
Tabela 2.5 - Usos benéficos dos sedimentos dragados (elaborado a partir de resolução nº 454/12 do CONAMA, BRASIL, 2012).....	19
Tabela 2.6 - Convenções e acordos internacionais para prevenção da poluição marinha (Góes filho, 2004).....	21
Tabela 2.7 - Número de amostra por volume dragado (elaborado a partir da resolução 454/12 do CONAMA, BRASIL, 2012).....	26
Tabela 2.8 - Classificação granulométrica dos sedimentos (elaborado a partir da resolução 454/12 do CONAMA, BRASIL, 2012).....	27
Tabela 2.9 - Situações de dispensa de caracterização química e ecotoxicológica (elaborado a partir da resolução nº 454/12 do CONAMA, BRASIL, 2012).....	27
Tabela 2.10 - Níveis de Classificação do material a ser dragado (resolução nº 454/12 do CONAMA, BRASIL, 2012).....	27
Tabela 2.11 - Valores Orientadores para Carbono Orgânico Total e Nutrientes (resolução nº 454/12 do CONAMA, BRASIL, 2012)	29
Tabela 2.12 - Situações químicas do sedimento para a realização dos ensaios de ecotoxicidade (a partir de resolução nº 454/12 do CONAMA, BRASIL, 2012)	29

Tabela 2.13 - Condições e formas recomendadas para a disposição do material dragado em AJN (a partir da resolução nº 454/12 do CONAMA, BRASIL, 2012)	30
Tabela 2.14 - Condições e formas recomendadas para a disposição do material dragado em solo (a partir da resolução nº 454/12 do CONAMA, BRASIL, 2012)	31
Tabela 2.15 - Valores orientadores de metais e metalóides para sedimento de águas salinas/ salobras (elaborado a partir de Bray, 2008).....	33
Tabela 2.16 – Possíveis impactos ambientais para atividade de dragagem (elaborado pelo autor).....	36
Tabela 3.1 – Classificação dos Geossintéticos (Vertematti, 2015).	38
Tabela 3.2 - Resistência à tração e deformação do geotêxtil em função da composição (Bezuijen & Vastenburg, 2013).....	45
Tabela 3.3 - Comportamento da filtração com relação à graduação do material (adaptado de Vidal & Urashima, 1999).....	47
Tabela 3.4 - Critérios de permeabilidade e permissividade para o geotêxtil (adaptado de Bezuijen & Vastenburg, 2013)	49
Tabela 3.5 - Critérios de retenção para o geotêxtil (adaptado de Palmeira e Gardoni, 2000 citado por Silva, 2014)	50
Tabela 3.6 - Critérios para dimensionamento hidráulico de tubos geotêxteis (adaptado de Lawson, 2008)	51
Tabela 3.7 - Critérios anti-entupimento do geotêxtil (adaptado de Christopher & Fischer, 1992).....	52
Tabela 3.8 - Principais formatos da seção transversal de tubos geotêxteis (adaptado de Pilarczyk, 2000).....	53
Tabela 3.9 - Razão de preenchimento e Altura final do sistema (adaptado de Pilarczyk, 2000).....	54

Tabela 3.10 - Normativas de ensaios de bolsa suspensa	66
Tabela 3.11 - Normativas e protocolo para ensaio com mini - geoforma	68
Tabela 3.12 - Dimensões previstas para os testes de mini-geoforma	68
Tabela 3.13 - Indicadores de avaliação do desempenho do processo com geotêxtil (elaborado a partir de Guimarães e Urashima, 2013)	71
Tabela 3.14 - Indicadores de avaliação operacional em tubo geotêxtil (elaborado a partir de Moo-Young & Tucker, 2002)	72
Tabela 4.1 - Características geométricas das lagoas do Complexo lagunar de Jacarepaguá (elaborado a partir de Feema, 1991 e SERLA, 1977 apud Sampaio, 2008)	76
Tabela 4.2 - Síntese cronológica de eventos para licenciamento e execução da dragagem no CLJ (elaboração própria)	88
Tabela 4.3 - Volume e características dos sedimentos a serem dragados por ambiente lagunar (elaborado a partir de MASTERPLAN, 2015)	89
Tabela 4.4 - Relação de áreas de disposição de material dragado em estudos ambientais (elaborado a partir de MASTERPLAN, 2013 e MASTERPLAN, 2015)	90
Tabela 4.5 - Macrodrenagem da Bacia de Jacarepaguá: Rios, volume de dragagem e custos previstos (elaborado a partir de SMAR, 2015)	91
Tabela 5.1 - Número de Estações de Coleta para amostragem dos sedimentos nos estudos ambientais do Completo Lagunar de Jacarepaguá	93
Tabela 5.2 - Coordenadas do local de coleta do material na Lagoa da Tijuca	94
Tabela 5.3 - Campanhas de coleta e quantidades do material (sedimento e água)	95
Tabela 5.4 - Percentual de conchas das amostras de sedimento	99
Tabela 5.5 – Formas de Nitrogênio associadas as etapas de degradação orgânica	116

Tabela 5.6 – Fração de metais nos sedimentos e principais extratores pelo método de Tessier (elaborado a partir de Domingues, 2009).....	122
Tabela 5.7 – Propriedades do tecido geotêxtil utilizado no experimento.....	124
Tabela 5.8 – Parâmetros e métodos analíticos de caracterização do sedimento.....	125
Tabela 5.9 – Parâmetros e métodos analíticos de caracterização da água.....	126
Tabela 5.10 – Propriedades dos polímeros testados para coagulação/floculação da lama de dragagem (Kemira, 2004).....	132
Tabela 5.11 – Condições operacionais da mistura no aparelho de <i>Jar test</i>	135
Tabela 5.12 – Características do principais tipos de impelidores (MacCabe, Smith e Harriott, 1993).....	137
Tabela 5.13 - Matriz experimental	145
Tabela 5.14 – Parâmetros e métodos analíticos de caracterização da água.....	146
Tabela 5.15 – Parâmetros e métodos analíticos de caracterização da torta no SGF.....	149
Tabela 6.1 - Distribuição granulométrica do sedimento da Lagoa da Tijuca.....	150
Tabela 6.2 - Coeficientes de Não Uniformidade (CNU) e coeficiente de Curvatura (CC) das amostras de sedimento	152
Tabela 6.3 - Limites de Atterberg e índices para amostras do sedimento da Lagoa da Tijuca.....	152
Tabela 6.4 - Teor de matéria orgânica das amostras de sedimento	153
Tabela 6.5 - Caracterização geotécnica do sedimento com relação a densidade relativa do grão (Gs), pesos específicos aparentes (γ_n e γ_d), umidades (Wd e Ww) e teor de sólido em peso (TSp).....	154
Tabela 6.6 - Valores de nutrientes do sedimento (P-total, NTK e COT)	156

Tabela 6.7 - Valores de metais traço (Pb, Cu, Zn e Fe) do sedimento	157
Tabela 6.8 - Cátions trocáveis do sedimento superficial da lagoa da Tijuca.....	159
Tabela 6.9 - Capacidade de Troca Catiônica de argilominerais (Stenveson, 1985 apud Borma, 1998).....	159
Tabela 6.10 - Características complementares do sedimento (pH, Eh, CEE)	160
Tabela 6.11 - Composição da fração fina do sedimento com base na FRX em porcentagem (%)	162
Tabela 6.12 - Características de argilominerais encontrados no sedimento pela FRX	163
Tabela 6.13 - Dados de parâmetros monitorados diretamente na água da lagoa da Tijuca	164
Tabela 6.14 - Valores de Nutrientes, COT, DBO e DQO da água da Lagoa da Tijuca	167
Tabela 6.15 - Valores de sólidos e Turbidez da água da Lagoa da Tijuca	168
Tabela 6.16 - Valores de metais (chumbo, Cobre, Zinco e Ferro) na água da Lagoa da Tijuca.....	168
Tabela 7.1 - Quantidades definidas para produção da lama de dragagem a 10% de teor de sólidos em peso.....	170
Tabela 7.2 – Parâmetros físicos aferidos na lama de dragagem produzida.....	171
Tabela 7.3 – Parâmetros de mistura da lama definidos nos ensaios de <i>Jar test</i>	181
Tabela 8.1 – Capacidade de Troca Catiônica das tortas retidas nos SGFs e sedimentos de origem (presente trabalho) e em sedimentos de estudos de Borma (1998), Castiglia (2006) e Monteiro (2008).....	213
Tabela 8.2 – Parâmetros que extrapolaram os padrões definidos no ensaio de solubilização para classificação da torta retida.....	215

Tabela 8.3 - Coeficientes de Não Uniformidade (Cnu), coeficiente de Curvatura (Cc) e Critério de retenção das tortas geradas nos SGFs.....	217
Tabela 8.4 - Limites de Atterberg e índices para as tortas dos SGFs e do sedimento da Lagoa da Tijuca	219
Tabela 8.5 – Tensões de pré-adensamento, Coeficientes de compressão e expansão, Razão de compressão e Razão de sobreadensamento para as tortas retidas nos SGFs	226

LISTA DE SIGLAS

ADC	Unidades de Disposição Confinada
AICD	Associação Internacional de Companhias de Dragagem
AJN	Águas sob Jurisdição Nacional
BEDS	Biological Effects Database for Sediments
CAD	Contained Aquatic Disposal
CDF	Confined Disposal Facilities
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
COT	Carbono Orgânico Total
CTCQA	Câmara Técnica de Controle e Qualidade Ambiental
DDS	Dikes Disposal Site
DIFID	Disposal From Instantaneous Discharge
ERL	Effect Range Low
ERM	Effect Range Medium
HAP	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
IVIG	Instituto Virtual Internacional de Mudanças Climáticas
LAEMSED	Laterally Averaged Estuarine Model of sediment
LC 72	Convenção de Londres
MARPOL	Marine Pollution – Convenção internacional de poluição marinha
MIKE	Model of knowledge of erosion and deposition of sediments
MPRSA	Marine Protection, Research, and Sanctuaries Act
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NSTP	Estatuto Nacional de Programa de Tendências
OAL	Órgão Ambiental Licenciador
OSPAR	Convenção de Oslo-Paris
PAE	Plano de Ação e Emergência
PCB	Bifenilas Policloradas
PEL	Probable Effect Level
PIANC	Permanent International Association of Navigation Congresses
SedNet	European Sediment Research Network
SISBAHIA	Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental
SSFATE	Suspend Sediment Fate
STFATE	Short-term Fate
TBT	Tributilestanho
TEL	Threshold Effect Level
UCD	Unidade de Caracterização de Dragagem
UDC	Unidades de Disposição Confinada
USACE	Guia de Avaliação Nacional para Dragagem
USACE	United States Army Corps of Engineers
USEPA	United States Environmental Protection Agency
VI	Valor de Investigação
VP	Valor de Prevenção
VR	Valor de Referência de Qualidade

1. INTRODUÇÃO

1.1. RELEVÂNCIA DO TEMA

O Brasil precisa de investimentos crescentes em infraestrutura, resultantes da falta de investimento no passado. Dentre as obras de infraestrutura, em especial as de cunho de transporte e sanitário, verifica-se a necessidade de implantação e ampliação portuária, bem como os serviços de desassoreamento e limpeza de canais, rios e lagos. Estas obras são viabilizadas com atividades de dragagem, a qual vem se deparando com entraves nos processos de licenciamento ambiental, principalmente, em virtude da destinação do material a ser dragado. A busca por diferentes alternativas para destinação dos sedimentos dragados tem sido pouco explorada nos processos de licenciamento ambiental das atividades de dragagem.

Os rejeitos dragados em áreas portuárias são predominantemente dispostos em bota-fora marítimos, mesmo apresentando a possibilidade de gerar impactos socioeconômicos e ambientais, tais como: alterações nas atividades pesqueiras e turísticas, inferências sobre o tráfego de embarcações, mudanças na qualidade da água, bem como soterramento e perturbação da biota aquática. Quando essas áreas destinadas a lançamento marítimos apresentam características de supersaturação e/ou grande interferência no entorno, as atividades de dragagem costumam ser paralisadas pela dificuldade em se adotar novas alternativas de destinação dos rejeitos.

Nos casos de destinação terrestre, a situação não tem sido muito diferente, ou se efetua uma disposição no solo com poucos critérios, ou se necessita de tratamento para envio do material a aterros licenciados para recebimento de resíduos.

Práticas de tratamento e/ou uso benéfico do material dragado, bem como a destinação confinada, têm sido documentadas na região dos grandes lagos entre EUA e Canadá, cujos trabalhos são conduzidos e/ou acompanhados pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE - *United States Army Corps of Engineers*)¹ e pela

¹ A USACE é uma agencia federal dos Estados Unidos que atua com atividades do departamento de defesa, bem como na gestão e projetos de obras públicas, inclusive na construção de barragens, canais e proteção contra inundações.

Agência de Proteção Ambiental Americana (USEPA - *United States Environmental Protection Agency*), produzindo documentos técnicos de boas práticas. Países da Europa, como a França e a Holanda também tem desenvolvido trabalhos com enfoque no aproveitamento deste material e a Associação Internacional de Navegação (PIANC - *Permanent International Association of Navigation Congresses*) tem elaborado guias, que vão além dos aspectos normativos.

No Brasil, as diretrizes e procedimentos de referência para o gerenciamento do material a ser dragado são estabelecidas na resolução 454/12 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), que enfatiza a caracterização físico-química e ecotoxicológica dos sedimentos como requisito para determinação de alternativas de destinação.

Dentre os processos de licenciamento ambiental que abordam a atividade de dragagem, um recorte feito no estado do Espírito Santo, verificou-se junto ao órgão ambiental estadual que em maio de 2015 existiam 29 licenças para atividade de dragagem, sendo 17% para dragagem em rios interiores e o restante de 83% para ambientes marinho ou de estuário. Na verificação dos estudos ambientais apresentados para concessão dessas licenças, constatou-se uma precária informação acerca das características dos materiais dragados e a indicação de destinação predominante em áreas de descarte marítimos, seguida de aterros de simples elevação topográfica e aterros sanitários licenciados (Souza et al., 2015).

A alternativa de destinação do material dragado em sistema geotêxtil fechado (SGF), ainda pouco utilizada no Brasil, foi praticada de forma pioneira, em larga escala, na dragagem do Canal do Fundão-RJ, entre 2009 e 2010, com a destinação de 500 mil m³ de sedimento contaminado. Desde então, essa técnica de desaguamento e acondicionamento de sedimentos contaminados tem sido utilizada em obras de dragagem como: a dragagem do estaleiro e base naval de Itaguaí na Baía de Sepetiba - RJ (300 mil m³), a dragagem do terminal Embraport em Santos-SP (580 mil m³), a dragagem do Tiplam em Santos - SP (500 mil m³), a dragagem do porto do rio para ilha de Pombeba - RJ (30 mil m³) e a dragagem de acesso ao terminal da General Eletric Oil & Gas em Niterói - RJ (45 mil m³).

Além dessas obras, a dragagem do Complexo Lagunar de Jacarepaguá - RJ prevê a utilização desta tecnologia tendo em vista que 4,8 milhões m³ de sedimentos serão removidos. As obras do Complexo Lagunar encontram-se, entretanto, não iniciadas até o momento.

Experimentos científicos do comportamento do material a ser dragado devem ser conduzidos para entendimento mais aprofundado do mecanismo de funcionamento do sistema geotêxtil fechado. Inclusive, o monitoramento de parâmetros geotécnicos clássicos e ambientais permite a compreensão do seu desempenho e a possível validação da tecnologia para a destinação dos sedimentos de dragagem de ambiente lagunar.

Além de contribuir com maior apropriação da tecnologia, esse trabalho propicia resultados científicos que podem conduzir à elaboração de projetos executivos mais detalhados, seguros e economicos, permitindo um licenciamento ambiental com maior agilidade e assertiva da sustentabilidade ambiental.

1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA

Objetivo Geral

Estudar o comportamento ambiental e geotécnico de sedimentos de dragagem do complexo lagunar de Jacarepaguá confinados em um sistema geotêxtil fechado experimental, com verificação da eficiência do processo de desaguamento, da conformidade da torta retida e do percolado gerado.

Objetivos Específicos

- Determinar características ambientais e geotécnicas dos sedimentos e da água da lagoa da Tijuca no complexo lagunar de Jacarepaguá, componentes de constituição da lama de dragagem hidráulica;
- Verificar o processo de desaguamento da lama de dragagem em sistema geotêxtil fechado experimental com vista ao desempenho na redução da umidade e no aumento da retenção de sólidos;
- Examinar o efluente do processo de desaguamento, com base em critérios e padrões definidos para lançamento em corpo hídrico;
- Examinar propriedades ambientais e geotécnicas da torta retida no sistema geotêxtil fechado experimental, frente às questões de resistência não drenada, coeficiente de adensamento, coeficiente de compressibilidade e a capacidade de retenção de contaminantes e nutrientes.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O capítulo 2 aborda a atividade de dragagem, contemplando os tipos, finalidades e equipamentos envolvidos no processo. Os aspectos e impactos ambientais desta atividade e suas medidas de controle e monitoramento são observados a luz do processo de licenciamento ambiental. De forma a apresentar o estado atual do conhecimento sobre as possibilidades de destinação do material dragado, efetuou-se uma descrição das formas de disposição marítima, disposição terrestre, uso benéfico e tratamento, bem como as convenções e diretrizes normativas para gestão dos sedimentos.

O capítulo 3 é direcionado à forma de disposição confinada por sistema geotêxtil fechado, detalhando-se então as propriedades e critérios para dimensionamento e utilização dessa tecnologia. Os ensaios preliminares para aplicação de sistema fechado com geotêxtil são apresentados com vista a identificar parâmetros de eficiência do processo de desaguamento.

O capítulo 4 descreve o complexo lagunar de Jacarepaguá, enfatizando os aspectos hídricos e os impactos de poluição e assoreamento sofrido devido ao processo de ocupação antrópica sem infraestrutura adequada. Relata ainda o histórico das medidas de esgotamento sanitário, drenagem e dragagem realizadas na bacia hidrográfica com vista à proteção e recuperação da mesma.

O capítulo 5 apresenta os materiais e métodos utilizados para caracterização dos sedimentos e da água; indica a metodologia de preparo e condicionamento da lama de dragagem com vista a floculação; detalha o procedimento experimental realizado em sistema geotêxtil fechado reduzido para desaguamento; e apresenta os métodos de análise do monitoramento da lama, do efluente e da torta retida.

O capítulo 6 expõe e discute os resultados de caracterização do sedimento e da água da lagoa da Tijuca utilizados para preparo da lama de dragagem.

O capítulo 7 apresenta o preparo de uma lama de dragagem representativa, indicando as proporções dos materiais, as características de viscosidade da lama, o estudo da dosagem de polímeros para melhor floculação e desaguamento, bem como os parâmetros de dimensionamento para a mistura da lama com a solução polimérica.

No capítulo 8 discute-se o comportamento do processo de desaguamento da lama de dragagem no Sistema Geotêxtil Fechado (SGF), evidenciando os aspectos ambientais e geotécnicos da torta retida no SGF e do percolado gerado no desaguamento.

O capítulo 9 relata as conclusões do estudo e indica recomendações para pesquisas futuras.

2. DRAGAGEM E DESTINAÇÃO DOS SEDIMENTOS

2.1. CONCEITO E HISTÓRICO

O termo dragagem é definido como a escavação ou remoção de solo ou rochas do fundo de rios, lagos, e outros corpos d'água através de equipamento denominado "draga", a qual é, geralmente, uma embarcação ou plataforma flutuante equipada com mecanismos necessários para efetuar a remoção do solo (Compton's Encyclopedia, 1998, apud Torres, 2000; IADC, 2010).

Aguiar (2013) acrescenta o derrocamento como um tipo especializado do serviço de dragagem, pois utiliza técnica de engenharia para a remoção de rochas, além do sedimento do fundo de corpos d'água. Este serviço especializado pode ser realizado por meio de plataformas ou embarcações, utilizando materiais explosivos ou até mesmo marteletes pneumáticos para retirada das rochas do fundo.

Num caráter histórico, Bray et al. (1997) relataram técnicas primitivas de dragagem utilizadas há centenas de anos antes de Cristo, como a construção de canais para fins de irrigação na Grécia antiga, a construção do canal da Babilônia unindo os rios Tigre e Eufrates na Mesopotâmia e ainda a construção do canal Jing-Han na China considerado o rio artificial mais longo e mais antigo ainda existente.

Os italianos podem ser considerados os pioneiros com relação ao processo atual de dragagem na Europa. Entretanto, são os franceses que apresentam a maior quantidade e extensão de canais dragados, enquanto os holandeses são os que mais investem na tecnologia (Compton's Encyclopedia, 1998 apud Torres, 2000).

2.2. OBJETIVOS DA DRAGAGEM

A Associação Internacional de Companhias de Dragagem (IADC - *International Association of Dredging Companies*) esclarece na publicação IADC (2010) que a atividade de dragagem pode ser realizada por diversas razões, tais como:

- Promover a criação, ampliação e manutenção da navegabilidade em portos, bacias, canais, marinas e hidrovias.
- Controlar a inundação, melhorando ou mantendo a capacidade de descarga ou de fluxo dos rios, canais e outros recursos hídricos superficiais, promovendo atividades para manter ou aumentar a seção transversal e/ ou realinhamento dos cursos d'água, e controlando as enchentes em áreas pantanosas ou de baixa altitude.
- Obter materiais de construção civil constituídos por areia, cascalhos, argila e outros agregados passíveis de serem utilizados em aterros, barragens, estradas, aeroportos e demais obras de cunho industrial e residencial.
- Executar obras subaquáticas, tais como a escavação para fundações ou assentamento de tubulações de petróleo em atividades offshore.
- Remediar impactos ambientais, removendo ou remediando os poluentes subaquáticos e melhorando a qualidade da água.
- Alargar a faixa de areia de praia com enchimento para a proteção e reposição de praias para recreação, bem como para a construção de dunas de proteção e ilhas artificiais, inclusive com formação de habitats para pássaros e outras formas de vida selvagem.
- Manter canais de irrigação e reservatórios, possibilitando a conservação e uso dos escassos suprimentos de água superficiais.
- Efetuar a mineração com a recuperação de minerais, metais preciosos, e fertilizantes minerais, ou a retirada do material sobrejacente para alcançar tais jazidas.

2.3. TIPOS DE DRAGAGEM

A dragagem tem sido realizada com o objetivo de manter as profundidades de navegação em portos e hidrovias. Palermo et al. (2008) acrescentam como objetivos o aprofundamento e alargamento de canais em rios, portos e baías; a exploração de depósitos minerais, diamantes e recursos marinhos de valor comercial; bem como a limpeza de ambientes contaminados. Tendo em vista essas finalidades, a dragagem é classificada em quatro tipos:

- Dragagem Inicial, de Implantação ou Aprofundamento - aquela executada para implantação, ampliação ou aprofundamento de canais de navegação, bacias de evolução e em outras obras ou serviços de engenharia em corpos de água cujo local ainda não foi dragado na profundidade requerida.
- Dragagem de Manutenção - aquela executada para restabelecer total ou parcialmente as condições originais, tendo em vista o assoreamento depositado ao longo do tempo por meio de processos naturais e antrópicos.
- Dragagem Ambiental ou de Remediação - executada para melhoria das condições ambientais ou para proteger a saúde humana, considerando a limpeza da área contaminada.
- Dragagem de Mineração - executada para efeito de exploração e aproveitamento econômico de recursos minerais, como argilas, areias e cascalho utilizados como materiais para construção civil, bem como ouro e outros minerais com reconhecido valor comercial.

Eisma (2005) esclarece que a dragagem de manutenção tem como principal meta manter, satisfatoriamente, as profundidades de portos, rios e canais propiciando a navegação, enquanto a dragagem ambiental visa à retirada de uma determinada quantidade de sedimentos contaminados. O autor citado acrescenta que na dragagem de manutenção ocorre a retirada de forma rápida de uma grande quantidade de material sedimentar, sendo que muitas vezes não se é dada a devida importância ao manejo do material dragado. Por outro lado, na dragagem ambiental existem procedimentos rigorosos aplicados tanto à operação de dragagem, quanto ao transporte e manejo deste material, assim como de sua disposição.

Algumas características dos diferentes tipos de dragagens foram observadas por Góes Filho (2004) e Eisma (2005) conforme apresentado no Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Características dos diferentes tipos de dragagem (elaborada a partir de Góes Filho, 2004 e Eisma, 2005)

Tipo de Dragagem	Características
Dragagem de aprofundamento	<ul style="list-style-type: none"> • Movimentação de grande quantidade de material; • Remoção de solos compactos em camadas não alteradas; • Baixa presença de contaminantes; • Atividade de dragagem não repetitiva.
Dragagem de Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • Quantidade de material variável; • Remoção de solo não compactos; • Possível presença de contaminantes; • Atividade repetitiva e rotineira.
Dragagem Ambiental	<ul style="list-style-type: none"> • Volumes reduzidos de dragagem; • Presença de materiais contaminados e altamente contaminados • Remoção de solos leves e não compactados • Atividade não repetitiva
Dragagem de Mineração	<ul style="list-style-type: none"> • Remoção de materiais com valor econômico • Atividade repetitiva

2.4. ATIVIDADE DE DRAGAGEM

Há casos em que a remediação dos sedimentos pode ocorrer sem a necessidade de dragagem. Esses casos consideram os métodos da não-ação, em que processos naturais se encarregam de melhorar gradualmente as condições do local, e os métodos da não-remoção, que requerem tratamento dos sedimentos *in situ*. No entanto, esses métodos da não-ação e não-remoção, utilizados para ambientes contaminados, não se aplicam quando se pretende aumentar profundidade e/ou alargar corpo hídrico, sendo necessário realizar a atividade de dragagem que envolve etapas de escavação, transporte e destinação do sedimento, conforme indica a Associação Internacional das Companhias de Dragagem - IADC (2010) .

A etapa de escavação consiste na retirada do material de fundo, que pode utilizar serviços de derrocamento para fragmentação de rochas e equipamentos para coleta do sedimento, como as dragas mecânicas, hidráulicas e pneumáticas. Nessa etapa, tecnologias sofisticadas de batimetria também podem ser utilizadas para acompanhar a profundidade e quantidade dragada.

A etapa de transporte compreende o deslocamento vertical e/ou horizontal do material retirado do fundo com objetivo de conduzi-lo ao local de destinação. Esse transporte pode ser realizado por barcaças, tubulações e dragas autotransportadoras (USACE, 2004). O IADC (2010) acrescenta os processos hidrodinâmicos, que permitem o deslocamento do material lançado na coluna d'água pelos métodos de injeção, agitação/erosão e/ou elevação.

A etapa que se refere à destinação do material dragado, seja para a disposição (em água ou solo), tratamento e/ou uso benéfico, deve analisar criteriosamente as alternativas existentes com intuito de optar por aquelas que condizem com os critérios socioeconômicos e ambientais de cada país ou região. Lembra-se que mais de uma forma de destinação costuma ser adotada tendo em vista o volume dragado e sua separação em função das características do sedimento (Dhollander, 2016).

Portanto, cada etapa da atividade de dragagem pode ser realizada com diferentes alternativas, conforme indicado no Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Etapas da atividade de dragagem e suas alternativas de realização (elaborado pelo próprio autor)

Etapas da dragagem	Alternativas de realização
Escavação	Mecânica Hidráulica Pneumática
Transporte	Barcaça /batelão Dutos Dragas autotransportadoras Hidrodinâmico
Destinação	Disposição: Aquática Terrestre Tratamento Uso benéfico

As alternativas de destinação do sedimento têm sido pouco exploradas nos estudos ambientais brasileiros que priorizam a disposição em corpos hídricos, principalmente quando se trata de dragagem marinha.

2.5. EQUIPAMENTOS DE DRAGAGEM

Os equipamentos de dragagem mais utilizados são classificados em três (03) grupos: mecânicos, hidráulicos e pneumáticos.

O IADC (2010), com base no modo de escavação e operação, classifica as dragas em quatro categorias: dragas mecânicas, dragas hidráulicas, dragas mistas (mecânicas/hidráulicas) e dragas hidrodinâmicas. Essas dragas podem ser estacionárias ou autopropulsoras, seja na fase de operação, transporte ou ambos os casos.

Os fatores que afetam a escolha do tipo e tamanho da draga para um dado projeto incluem: o volume a ser dragado; condições do local (profundidade, inclinação do leito, correntes e ondas); características físicas e químicas do sedimento; presença de entulhos, vegetação, pedras soltas ou rocha subjacente; limitações físicas do local, tais como pontes e largura do corpo hídrico; distância do local de disposição do material dragado; métodos de tratamento e disposição final do material dragado; disponibilidade e custos dos equipamentos; e desempenho (PALERMO et al., 2008).

2.5.1. Equipamentos Mecânicos

As dragas que utilizam meios mecânicos para a escavação do material atuam geralmente de forma simplificada e possuem semelhanças aos equipamentos utilizados para terraplenagem. Esses equipamentos efetuam a escavação de dragagem com laminas, dentes ou arestas de corte, sendo aplicados normalmente a solos coesivos como argila, turfa, e silte altamente consolidado. As vantagens e desvantagens deste tipo de draga são apresentadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Dragas Mecânicas: Vantagens e desvantagens (elaborado a partir de Palermo et al., 2008)

Vantagens	<ul style="list-style-type: none">• Capaz de remover os materiais rígidos e com dimensões maiores.• Permite trabalhar em áreas apertadas e profundas.• Eficiente para transporte por barcaças a longas distâncias.• Retira os sedimentos com volume reduzido de água.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none">• Produtividade menor que as dragas hidráulicas.• Necessitam de barcaças para o transporte dos sedimentos.

Os principais tipos de equipamentos são: caçamba de mandíbulas (*Grab ou Clamshell*); Pá de arrasto (*dragline*); Retroescavadeiras (*Backhoes*); Escavadeiras frontais (*Dipper*); Dragas de Alcatruzes (Bucker ladder).

2.5.2. Equipamentos Hidráulicos

A escavação hidráulica é feita com jatos de água que atuam principalmente em solos menos coesivos, como cascalho, areia e silte pouco consolidado. As dragas hidráulicas são mais eficientes, versáteis e econômicas que as mecânicas, pois obtém rendimentos mais elevados nas operações contínuas.

O principal componente da draga hidráulica é a bomba de dragagem, que é utilizada para remover o material escavado (mistura de água e sedimento) e transportá-los por meio de tubulação a uma distância compatível com a potência da bomba. O sistema hidráulico é constituído por bomba centrífuga acionadas por motores a diesel ou elétricos e tubulações, que variam de 0,15 m a 1,2 m de diâmetro, mantidas sobre a água através de flutuadores. O dimensionamento do sistema depende da distância de bombeamento, o tamanho dos sedimentos, quantidade de detritos, elevação, e outros fatores.

Estas dragas removem os sedimentos na forma de lama, cujo teor de sólidos é tipicamente de 10 a 20 por cento em peso, mas teores inferiores podem ser comuns para a dragagem ambiental porque se opera com uma menor taxa de produção visando reduzir a ressuspensão e resíduos (Herbich e Brahme ,1991 apud USEPA, 1994).

A grande quantidade de água dragada junto com o sedimento (cerca de quatro para um em volume) gera um importante aspecto ambiental a ser observado na operação, devendo-se considerar instalações de desaguamento, tratamento e lançamento adequado para os efluentes, especialmente quando se trata de sedimentos contaminados e de granulometria fina (Palermo et al., 2008). As vantagens e desvantagens deste tipo de draga são verificadas no Tabela 2.4

Tabela 2.4 - Dragas Hidráulicas: Vantagens e Desvantagens (elaborado a partir de Palermo et al., 2008)

Vantagens	<ul style="list-style-type: none">• Capaz de escavar diferentes tipos de materiais com melhores taxas de produção que a draga mecânica, pois permite a mudança da cabeça de corte.• Capaz de dragar em uma base praticamente contínua com maior produção de dragas mecânicas de tamanho similar.• Capaz de bombear o material dragado diretamente para disposição em instalações confinadas e instalações de desaguamento/tratamento do sedimento.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none">• Dificuldade em dragar detritos maiores, devido à limitação de custo e potência do sistema hidráulico.• Uma quantidade de água em excesso é gerada, proporcionando um elevado potencial de custo de desidratação dos sedimentos e tratamento de água.

Os principais tipos são as dragas autotransportadoras de sucção (*Trailing suction hopper dredge*) e as dragas de corte e sucção (*Cutter suction dredge*).

2.5.3. Equipamentos Pneumáticos

As dragas pneumáticas realizam a dragagem sem utilizar desagregadores e praticamente sem gerar dispersão dos sedimentos no corpo hídrico. Trata-se de um tubo de sucção utilizando um sistema com pressão de ar comprimido na ponta que induz a aspiração de pequenos sedimentos de fundo, este método é conhecido como “*Air-lift*”. Essas dragas são recomendadas para dragagens de materiais poluídos que não necessitam de corte e requerem cuidados ambientais especiais (Soares, 2006).

2.6. DESTINAÇÃO DO SEDIMENTO DRAGADO

2.6.1. Disposição aquática

A disposição do sedimento dragado em corpo hídrico pode ser realizada em oceanos, estuários, rios, lagos e lagoas. McAnally e Adamec (1987) relataram que em geral a disposição aquática reduz custo da dragagem. O Corpo de engenheiros do exército dos Estados Unidos (*USACE - United States Army Corps of Engineers*) e a Associação Internacional de Companhias de Dragagem (*IADC - International Association of Dredging Companies*) indicam que a disposição aquática pode ocorrer de forma irrestrita e confinada (USACE, 2004 e IADC,2010).

- Disposição irrestrita

A disposição irrestrita é a disposição subaquática mais simples e consiste no lançamento do material dragado em corpos hídricos, formando um monte de sedimentos no fundo sem a utilização de medidas de isolamento de áreas adjacentes. Essa forma de disposição é geralmente aplicada a materiais limpos ou moderadamente contaminados e tem sido comumente praticada em mar aberto para minimizar os custos da dragagem. Essa forma de disposição pode ser dispersiva e não dispersiva (retenção).

A forma dispersiva é utilizada na expectativa de que os sedimentos serão transportados para fora do local de disposição, deixando espaço para disposição adicional. Para essa disposição geralmente utiliza-se dutos, dragas autotransportadoras ou barcaças conforme indica a Figura 2.1.

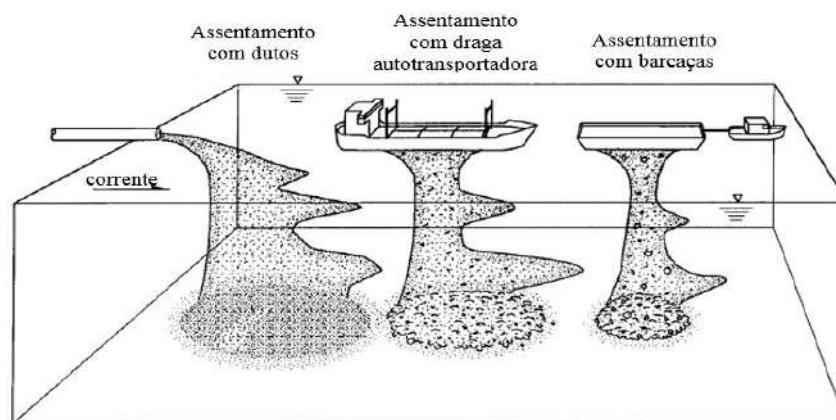


Figura 2.1 - Forma de disposição aquática irrestrita dispersiva (USACE, 2004)

Na forma não dispersiva o material deve permanecer no local de disposição, exigindo para isso uma baixa energia hidrodinâmica da área, difusores submersos e/ou um capeamento do sedimento², conforme se observa na Figura 2.2.

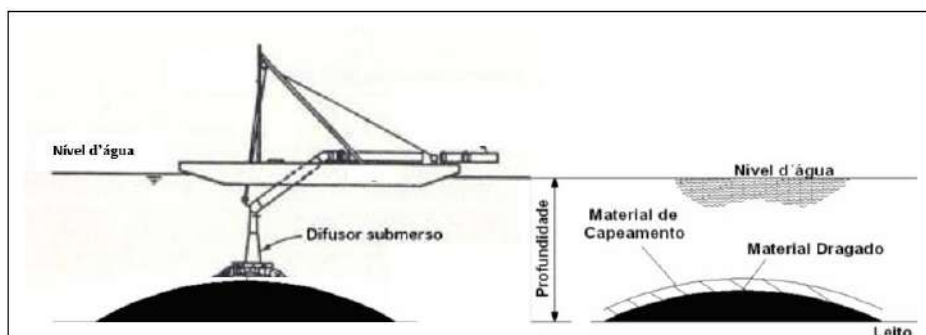


Figura 2.2 - Forma de disposição aquática irrestrita não dispersiva (USACE, 2004)

Plano de gestão do descarte deve ser elaborado contendo monitoramento de campo, testes de laboratório e modelagem numérica para melhor definir a forma e local de destinação. Modelos numéricos de transporte de sedimento são utilizados para se verificar as plumas de dispersão, dentre eles: DIFID - *Disposal From Instantaneous Discharge*, STFATE - *Short-term Fate*, SSFATE - *Suspend Sediment Fate*, LAEMSED e STUDH (utilizados pelo USACE); MIKE (desenvolvido pelo Instituto de hidráulica da Dinamarca) e SISBAHIA - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (desenvolvido pela COPPE/UFRJ).

- Disposição confinada

A disposição confinada consiste na disposição de material dragado em ambiente especialmente projetado para confinamento, devido à frequente presença de contaminante. Essas Unidades de Disposição Confinada - ADC (*Confined disposal facilities – CDF*) podem ocorrer de diferentes formas em função da característica do confinamento e do local. No caso de disposição em corpo hídrico tem-se a contenção em cavas subaquáticas (*Contained Aquatic Disposal - CAD*), em diques (*dikes disposal site- DDS*) e de forma ensacada.

² A técnica de capeamento subaquático de material contaminado lançado no fundo de água abertas, chamado de *Leves Bottom Capping- LBC*, começou a ser praticada pelo USACE no final da década de 70 (USACE, 2004).

As contenções em cavas subaquáticas utilizam as depressões naturais ou escavadas em locais previamente estudados para a disposição do material dragado dentro de corpo hídrico.

A construção de diques específicos para contenção do material dragado pode ocorrer diretamente no corpo hídrico com formação de ilhas, em área costeira com ampliação da linha de costa e até em terra firme. Para escolher o local de construção do dique diversos fatores devem ser considerados, tais como: a disponibilidade de área e a capacidade volumétrica de armazenamento; acesso ao local; proximidade de ambientes ecologicamente sensíveis; topografia e meteorologia; além de estudos geotécnicos visando as fundações dos diques (USACE, 2004).

O ensacamento do material dragado pode ocorrer em sistemas geotêxteis fechados, cuja disposição confinada pode servir como contenção e permitir o desaguamento. Esta técnica será abordada com detalhe no capítulo 3.

2.6.2. Disposição terrestre

A disposição do sedimento dragado em área terrestre pode ocorrer diretamente no solo, em área de disposição controlada, em aterros licenciados para resíduos e em disposição confinada (BRASIL, 2012).

- *Disposição diretamente no solo e aterros hidráulicos*

A disposição de rejeitos, em geral, no solo requer a observância de critérios ambientais para minimizar a poluição do ambiente. No caso em que o rejeito é constituído por sedimento dragado há de se observar os critérios de contaminação (química e biológica) além dos critérios físicos (granulometria, umidade, densidade e outros) que interferem diretamente sobre os aspectos geotécnicos, considerando especialmente o uso futuro da área de descarte do material.

O aterro construído por meio de uma técnica que envolve o transporte e a deposição do solo com auxílio de água, denominado aterro hidráulico³, tem sido utilizado

³ A técnica de aterro hidráulico foi utilizada pela primeira vez no século XVII na Holanda (DE JODEM, 1977 apud IMO, 2006).

para a construção de barragens de rejeitos, diques de contenções, recuperação de áreas submersas e formação de ilhas artificiais. Dentre os critérios a serem observados na execução deste tipo de aterro deve-se ficar atento especialmente a não contaminação do material, bem como a granulometria (solos não coesivos são os mais utilizados), a densidade do aterro (essencial maximizar para aumentar estabilidade da estrutura) e a segregação hidráulica que atua sobre a distribuição granulométrica do depósito (Ribeiro, 2000 e Espósito, 2000).

- Disposição controlada

A disposição controlada é indicada para sedimentos dragados com características específicas e para local de uso e ocupação industrial do solo, sem contato com a água subterrânea e sem contato direto com pessoas.

- Aterros licenciados para resíduos

Os aterros devidamente licenciados também podem receber materiais dragados desde que os mesmos estejam dentro dos critérios de recebimento. Além dos custos⁴, o teor de umidade tem sido um limitador por interferir na estabilidade do aterro e geração do lixiviado. Os resíduos sólidos urbanos normalmente recebidos nos aterros sanitários apresentam umidade na faixa de 40% a 60% (Bidone e Povinelli, 1999), enquanto que nos EUA variam de 15% a 40%.

- Disposição confinada

O confinamento do material dragado também pode ocorrer em instalações terrestres, seja em cavas de mineração, áreas confinadas por diques ou na forma de ensacamento com geotêxteis.

⁴ O custo americano para disposição em aterro sanitário varia de US \$ 20 a US \$ 120 por m³, enquanto que em Unidade de Disposição Confinada (CDFs) para sedimentos contaminados o valor varia de US \$ 15 a US \$ 50 por m³ (Mastin, Leinster e Salley, 2008).

2.6.3. Uso benéfico

O Corpo de engenheiros do exército dos Estados Unidos (*USACE - United States Army Corps of Engineers*) e a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*USEPA - United States Environmental Protection Agency*) entendem que o termo uso benéfico está relacionado ao benefício que a aplicação do material dragado pode trazer para a sociedade e o meio ambiente.

Associação internacional de navegação (*PIANC - Permanent International Association of Navigation Congresses*) define uso benéfico como qualquer uso do material desde que o mesmo não seja tratado como rejeito (PIANC, 1992).

A resolução nº 454/12 do CONAMA identifica como possíveis tipos de usos benéficos do sedimento dragado a sua utilização como: elementos de obras de engenharia, insumos para construção civil e industrial, incrementos na agricultura e aquicultura e melhorias ambientais, conforme detalhado no Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Usos benéficos dos sedimentos dragados (elaborado a partir de resolução nº 454/12 do CONAMA, BRASIL, 2012)

Tipos de uso	Formas de uso
Elementos de obras de engenharia	<ul style="list-style-type: none">• Aterro para portos, aeroportos, ancoradouros;• Recomposição e engordamento artificial de praia;• Estabilização da linha de costa, margens de rios e controle de erosão;• Bermas offshore;• Material de capeamento e preenchimento de células sedimentares;• Criação e reforço de terreno;• Construção de diques, barragens e rodovias.
Insumos para construção civil e industrial	<ul style="list-style-type: none">• Não especificados pela norma
Incrementos na agricultura e aquicultura	<ul style="list-style-type: none">• Não especificados pela norma
Melhorias ambientais	<ul style="list-style-type: none">• Restauração e estabelecimento de áreas úmidas;• Recuperação de solo, margens erodidas e áreas degradadas;• Formação de ilhas de nidificação

A PIANC (1992) indica que a destinação do material com uso benéfico deve ter prioridade na escala decisória e não deve ocorrer apenas em três situações: o material apresentar-se contaminado, não existe possibilidade técnica de uso ou não há solução aceitável para o uso.

Essa associação relata ainda que ao se reduzir o nível de contaminação nos rios, lagos e portos surge uma maior porcentagem de material adequado para uso. Além disso,

a flexibilização de medidas conservativas inerentes a padrões ambientais, obtida devido ao incremento científico do conhecimento, pode gerar um volume ainda maior de material que se torna aceitável para o uso benéfico. Até mesmo os métodos de dragagem são discutidos e podem alterar as propriedades do material, influenciando na sua aceitabilidade para o uso. Esses fatores aliados ao esgotamento de local aceitável para simples disposição ampliam a importância do uso benéfico do material proveniente da dragagem (Stephens, 2013).

2.6.4. Tratamento dos sedimentos dragados

Considerando que para disposição e/ou uso benéfico o material necessita de algum tratamento e ainda que o sedimento contaminado pode ser tratado independente de sua remoção, uma série de métodos e equipamentos podem ser necessários em função da atividade de beneficiamento que se deseja.

Bortone e Palumbo (2007) ao relatarem os trabalhos realizados pela rede europeia de pesquisa em sedimento (*SedNet- European Sediment Research Network*) abordam as técnicas de tratamento disponíveis nas condições de larga escala e em sistemas piloto. Hakstege (2007) agrupa essas técnicas nas categorias de tratamento térmico (dessorção, produção de tijolo, produção de agregados leves, produção de basalto artificial, produção de cimento), tratamento biológico (bioreator, landfarming, fitorremediação), tratamento químico (estabilização/imobilização) e tratamento físico (separação, desaguamento).

Embora uma variedade de técnicas de tratamento de sedimentos sejam abordadas na literatura, este trabalho se dedica ao tratamento promovido pelo processo de desaguamento em sistema geotêxtil fechado, cujo detalhamento e exploração do tema são apresentados no capítulo 3.

2.7. NORMATIVAS PARA DESTINAÇÃO DO MATERIAL DRAGADO

2.7.1. Convenções Internacionais

Os primeiros critérios para a destinação do material dragado surgiram na década de 1970 a partir de diretrizes estabelecidas em convenções internacionais de prevenção da poluição marinha e respectivos protocolos, conforme se observa na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Convenções e acordos internacionais para prevenção da poluição marinha (Góes filho, 2004).

Acordos, convenções e Diretrizes	Abrangência
Convenção de Londres, 1972	Global
MARPOL – 73/78	Global
Convenção da Lei do Mar 1982	Global
Convenção da Basileia, 1989	Global
Convenção de Oslo, 1972	Regional, Atlântico Nordeste
Convenção de Paris, 1974	Regional, Atlântico Nordeste
Convenção de Helsinque, 1974	Regional, Mar Báltico
Convenção de Barcelona, 1977	Regional, Mediterrâneo
Convenção do Kuwait, 1978	Regional, Golfo da Arábia
Convenção de Abidjan, 1981	Regional, África Central e Ocidental
Convenção de Jeddah, 1982	Regional, Mar Vermelho e Golfo de Áden
Convenção de Cartagena, 1983	Regional, Caribe
Convenção de Nairóbi, 1985	Regional, Leste da África
Convenção de Lima, 1988	Regional, Pacífico Sul

Dentre essas convenções pode-se citar a convenção de Oslo-Paris (OSPAR), a convenção de Helsinque, a convenção de Barcelona que referem-se as regiões do atlântico norte, mar Báltico e mediterrâneo, respectivamente (Bray, 2008).

Numa abordagem global, aplicável a todos os mares e oceanos, tem-se em especial a Convenção de Londres⁵ (LC 72) cujo objetivo é promover o controle efetivo de todas as fontes de poluição marinha e de tomar todas as medidas possíveis para evitar a poluição do mar pelo alijamento de resíduos e outras matérias. Com a intenção de modernizar essa Convenção e eventualmente substituí-la, em 1996 foi criado o protocolo de Londres que entrou em vigor em março de 2006 (IMO, 2006).

⁵A Convenção para Prevenção da Poluição Marinha por alijamento de resíduos e outras matérias foi concluída em Londres em 29 de dezembro de 1972, entrando em vigor em 1975. Possui 87 países signatários (IMO, 2006).

O grupo científico dessa Convenção desenvolveu 08 (oito) diretrizes específicas⁶ referentes aos materiais que podem ser lançados no mar, dentre as quais se tem as diretrizes para material dragado criado em 1986 e sucessivamente atualizada por documentos mais recentes (IMO, 2006).

Dentre as diretrizes específicas para material dragado destaca-se a avaliação dos impactos potenciais, que deve considerar:

- Se o material dragado está apto a ser lançado em uma área marinha, tendo em vista o incremento de substâncias que podem causar efeitos adversos.
- A extensão dos efeitos adversos de uma substância, em função, especialmente, do fluxo de entrada no sistema, dos processos físicos, químicos e biológicos que controlam o transporte, comportamento, destino e distribuição da substância.
- Magnitude do fluxo de contaminantes para o ambiente, comparando a quantidade de contaminantes advindos da atividade de lançamento do material dragado e oriundo de outras fontes.
- Características temporais do ambiente identificando períodos críticos do ano relacionados aos ciclos da vida marinha, propiciando planejamento das atividades para períodos que causam menor impacto.

Segundo Lima (2009) as diretrizes, em geral, têm um foco muito mais voltado ao impacto da disposição em si, considerando os aspectos físicos, químicos e biológicos do local de disposição e sua capacidade de suporte, do que a simples caracterização do material a ser dragado.

⁶ As oito diretrizes específicas são: 1) Material dragado; 2) Lamas de esgoto tratado; 3) Resto de indústria de pesca; 4) Navios e plataformas; 5) Material geológico inerte ou inorgânico; 6) Material orgânico de origem natural; 7) Materiais compostos primariamente de ferro, aço e concreto; 8) dióxido de carbono capturado em processo de seqüestro de carbono.

2.7.2. Normativas Americanas

Nos Estados Unidos, o congresso nacional estabeleceu em 1972 o *Marine Protection, Research, and Sanctuaries Act – MPRSA*, conhecido como *Ocean Dumping Act* que implementa normas e critérios da convenção de Londres e regula a disposição de material dragado no oceano.

Essa lei atribuiu competência para que o USACE e a USEPA tratassem do assunto e desde então diversos guias e documentos técnicos foram elaborados para a gestão do material dragado. Dentre eles pode-se citar o *Framework for dredged Material Management (EPA842-B-92-008)* que fornece um documento técnico consistente com alternativas ambientalmente aceitáveis para o gerenciamento do material dragado e o *Evaluation of Dredged Material proposed for ocean Disposal (EPA 503/8-9/0001)* cujas diretrizes para descarte de materiais dragados no oceano são definidas com base na toxicidade e bioacumulação e não apenas em termos de concentrações de parâmetros químicos, cujos níveis são classificados como: ERL (*Effect Range Low*) e ERM (*Effect Range Medium*)⁷.

Cada estado americano possui uma forma de tratar os sedimentos dragados, os estados da região dos Grandes Lagos os consideram como materiais de escavação e incentivam o uso benéfico. Para disposição no solo cada estado possui seus valores orientadores próprios.

2.7.3. Normativas Canadenses

A gestão do sedimento dragado no Canadá também é definida por vários guias orientadores, dentre os quais se tem o *Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life*, e o *Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health*. Esses documentos indicam ações para destinação de material dragado na água e no solo, respectivamente, indicando os níveis de referência para substâncias cujas concentrações podem apresentar efeitos adversos. Esses níveis

⁷ ERL - representa o percentil 10% de concentração que corresponde à condição de baixa probabilidade de efeitos associados; ERM representa ao percentil 50% de concentração que corresponde à condição de maior probabilidade de ocorrência de efeitos associados (MACDONALD et al., 1996; BURTON, 2002; LIMA, 2009 apud SILVEIRA, 2016).

denominados TEL (*Threshold Effect Level*) e PEL (*Probable Effect Level*)⁸ são considerados muito rigorosos em se tratando do alijamento de material dragado em água doce ou salina.

2.7.4. Normativas Brasileiras

O Brasil, por meio do Decreto Federal nº 87.566 de 16 de setembro de 1982, internalizou a Convenção de Londres 72 e conseqüentemente as diretrizes criadas como orientadoras de conduta para prevenção da poluição marinha por alijamento de resíduos e outras matérias.

O Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) criou, em 2002, um grupo de trabalho para a reflexão, discussão e formulação de diretrizes gerais para a avaliação do material a ser dragado em águas jurisdicionais brasileiras⁹. Como resultado, foi instituído a Resolução nº 344 do CONAMA em 25 de março de 2004 que estabeleceu critérios a serem observados no processo de licenciamento ambiental para disposição do material dragado.

Essa norma brasileira promoveu a classificação dos critérios de qualidade do sedimento em dois níveis (nível 1 e nível 2) com base em duas diretrizes de qualidade de sedimento norte-americanas: a utilizada pela Agência Ambiental do Canadá (*Enviromental Canada*) e pela Agência nacional de administração oceânica e atmosférica dos Estados Unidos (NOAA - *National Oceanic an Atmospheric Administration*).

Uma das principais críticas a essa resolução foi o fato de se utilizar como referência os contaminantes atuantes em águas e sedimentos do hemisfério norte e não tropicais. Contudo, a própria norma em seu artigo 9º indicou o prazo de 05 (cinco) anos

⁸ TEL - média geométrica entre o percentil 15% da concentração do conjunto de efeitos observados e o percentil 50% do conjunto de efeitos não observados. PEL - média geométrica entre o percentil 50% da concentração do conjunto de efeitos observados e o percentil 85% do conjunto de efeitos não observados (MACDONALD et al., 1996; BURTON, 2002; LIMA, 2009 apud SILVEIRA, 2016).

⁹ As águas jurisdicionais brasileiras compreendem: a) águas interiores (águas dos portos; das baías; dos rios e suas desembocaduras; dos lagos, lagoas e canais e águas entre os baixios a descoberto e a costa); b) águas marinhas (águas abrangidas pela faixa de 12 milhas marítimas a partir da linha de base reta e da linha de baixamar; águas abrangidas pela faixa que se estende das 12 milhas marítimas até 200 milhas marítimas; águas sobrejacentes a plataforma continental, quando ultrapassa os limites da Zona Econômica Exclusiva).

para revisão com objetivo de estabelecer valores orientadores nacionais para classificação do material dragado.

Considerando que o prazo não foi suficiente, a resolução nº 421 do CONAMA de 04 de fevereiro de 2010 concedeu mais 24 meses para a Câmara Técnica de Controle e Qualidade Ambiental (CTCQA) apresentar a proposta de revisão.

Devido à necessidade de estabelecer valores orientadores que reflitam a realidade brasileira referentes à qualidade ambiental dos sedimentos dragados no país, e subsidiar especialmente a reformulação do níveis de classificação do material a ser dragado, o Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais (IVIG/COPPE/UFRJ) desenvolveu um projeto que coleta, valida e integra os dados dos portos marítimos brasileiros, a saber: Santos, Rio Grande, São Francisco do Sul, Salvador, Aratu, Recife, Suape e Belém.

Esse projeto concluiu que os dados compilados constituem uma etapa relevante para conhecimento da situação de contaminação dos sedimentos nos portos brasileiros, mas apresenta limitações pelo fato de: (1) o volume de dados disponíveis ainda é reduzido; (2) os dados disponíveis estarem concentrados em alguns portos específicos e assim não oferecerem uma representatividade para toda estrutura portuária nacional; e (3) a frequência e localização dos pontos amostrais de cada porto terem sido estabelecidas em função da atividade de dragagem daquele momento e não com a preocupação de oferecer um panorama representativo de todo o porto (IVIG/COPPE/UFRJ, 2011).

Considerando as limitações dos dados de caracterização de sedimentos dragados no Brasil, recorreu-se aos critérios estabelecidos em Quebec e Hamburgo para readequação dos valores orientadores da qualidade ambiental dos sedimentos, e assim foi instituída a resolução do CONAMA nº 454 de 01 de novembro de 2012 que revogou as resoluções anteriores (344/04 e 421/10). Ressalta-se que essa nova resolução, cujas diretrizes são observadas a seguir, não se aplica as dragagens para fins de mineração.

Diretrizes da Resolução nº 454/12 do Conselho Nacional do Meio Ambiente

A resolução do CONAMA nº 454 de 01 de novembro de 2012 é o documento normativo brasileiro em vigor que estabelece as diretrizes e procedimentos referenciais para o manejo do material a ser dragado em Águas sob Jurisdição Nacional (AJN). Essa norma estabelece:

a) Diretrizes dos Planos de Amostragem do material a ser dragado:

A amostragem do sedimento com representatividade do local deve considerar área e profundidade (perfil vertical a dragar), possibilitando representatividade espacial do volume dragado. As amostras simples (pontuais) tem quantidade definida em função do volume de dragagem prevista (Tabela 2.7) e as amostragem composta, definida como Unidade de Caracterização de Dragagem (UCD), representam o agrupamento de materiais com características granulométricas e níveis de contaminação semelhantes para um volume máximo de 200.000 m³. O plano deve prever ainda o georeferenciamento dos pontos de coleta, a metodologia analítica, medidas de preservação e transporte, bem como os equipamentos de coletas.

Tabela 2.7 - Número de amostra por volume dragado (elaborado a partir da resolução 454/12 do CONAMA, BRASIL, 2012)

Volume a ser dragado (m³)	Número de amostras
Até 25.000	3
Entre 25.000 a 100.000	4 a 6
Entre 100.000 a 500.000	7 a 15
Entre 500.000 a 2.000.000	16 a 30
Acima de 2.000.000	10 extras por 1 milhão de m ³
Obs.: Rios e hidrovias devem ter amostra coletadas a uma distância máxima de 500 metros, independente do volume.	

b) Procedimentos de caracterização e classificação do material a ser dragado:

A característica física básica inclui o volume e a granulometria do sedimento com base na escala Wentworth ou Phi (Tabela 2.8).

Tabela 2.8 - Classificação granulométrica dos sedimentos (elaborado a partir da resolução 454/12 do CONAMA, BRASIL, 2012)

Classificação	Escala Granulométrica de Wentworth Phi (Φ)	Diâmetro da partícula (mm)
Areia muito grossa	-1 a 0	2 a 1
Areia grossa	0 a 1	1 a 0,5
Areia média	1 a 2	0,5 a 0,25
Areia fina	2 a 3	0,25 a 0,125
Areia muito fina	3 a 4	0,125 a 0,062
Silte	4 a 8	0,062 a 0,00394
Argila	8 a 12	0,00394 a 0,0002

A Caracterização química deve ser realizada quando a granulometria apresentar características diferentes das indicadas nas situações da Tabela 2.9.

Tabela 2.9 - Situações de dispensa de caracterização química e ecotoxicológica (elaborado a partir da resolução nº 454/12 do CONAMA, BRASIL, 2012).

Situação	Características granulométricas do sedimento	Volume dragado (m³)
1	100 % de areia e granulometria superiores	-
2	≥50% composto de areia grossa, muito grossa, cascalho ou seixo	-
3 ^a	≥90% de areia	< 100.000
4 ^b	≥90% de areia	< 10.000

Notas:

a - Dependerá da vazão ou do volume do corpo hídrico receptor, da justificativa do empreendedor e do aceite do Órgão ambiental Licenciador, quando for dragagem em rios lagos ou reservatórios

b - Exclusivo para dragagens em rios, lagos ou reservatórios

Essa caracterização química compreende a verificação de metais e semimetais (contaminantes inorgânicos), bem como dos contaminantes orgânicos, tais como: Tributilestanho (TBT), pesticidas organoclorados, Bifenilas policloradas (PCB) e Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HAP).

Os valores correspondentes aos níveis de classificação desses elementos são definidos na Tabela 2.10, onde o nível 1 representa o limiar abaixo do qual se prevê baixa probabilidade de efeito adverso a biota e o nível 2 é o limiar acima do qual se prevê um provável efeito adverso a biota.

Tabela 2.10 - Níveis de Classificação do material a ser dragado (resolução nº 454/12 do CONAMA, BRASIL, 2012)

Substâncias		Níveis de Classificação do material a ser dragado				
		Água Doce		Água Salina/Salobra		
		Nível 1	Nível 2	Nível 1	Nível 2	
Metais e semi metais (mg/kg)	Arsênio (As)	5,9	17	19	70	
	Cadmio (Cd)	0,6	3,5	1,2	7,2	
	Chumbo (Pb)	35	91,2	46,7	218	
	Cobre (Cu)	35,7	197	34	270	
	Cromo (Cr)	37,3	90	81	370	
	Mercúrio (Hg)	0,17	0,486	0,3	1,0	
	Níquel (Ni)	18	35,9	20,9	51,6	
	Zinco (Zn)	123	315	150	410	
TBT (µg/kg)	Tributilestanho	-	-	100	1000	
Pesticidas Organoclorados (µg/kg)	HCH (alfa – HCH)	-	-	0,32	0,99	
	HCH (Beta – HCH)	-	-	0,32	0,99	
	HCH (Delta – HCH)	-	-	0,32	0,99	
	HCH (Gama – HCH/Lindano)	0,94	1,38	0,32	0,99	
	Clordano (Alfa)	-	-	2,26	4,79	
	Clordano (Gama)	-	-	2,26	4,79	
	DDD ^a	3,54	8,51	1,22	7,81	
	DDE ^b	1,42	6,75	2,07	374	
	DDT ^c	1,19	4,77	1,19	4,77	
	Dieldrin	2,85	6,67	0,71	4,3	
	Endrin	2,67	62,4	2,67	62,4	
Bifenilas Policloradas - PCBs (µg/kg)	Bifenilas Policloradas somatório das 7 bifenilas ^d	34,1	277	22,7	180	
Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos - HAPs (µg/kg)	Grupo A	Benzo(a)antraceno	31,7	385	280	690
		Benzo(a)pireno	31,9	782	230	760
		Criseno	57,1	862	300	850
		Dibenzeno(a,h)antraceno	6,22	135	43	140
	Grupo B	Acenafteno	6,71	88,9	16	500
		Acenaftileno	5,87	128	44	640
		Antraceno	46,9	245	85,3	1100
		Fenantreno	41,9	515	240	1500
		Fluoranteno	111	2355	600	5100
		Fluoreno	21,2	144	19	540
		2-metilnaftaleno	20,2	201	70	670
		Naftaleno	34,6	391	160	2100
	Pireno	53	875	665	2600	
Somatória de HAPs ^e		1000	-	4000	-	

a) DDD: 2,2-bis (p-clorofenil)-1,1-dicloroetano ou diclorodifenildicloroetano. Este critério se aplica à soma dos isômeros p,p' e o,p';
b) DDE: 1,1-dicloro-2,2,bis (p-clorofenil) etileno ou diclorodifenildicloroetileno. Este critério se aplica a soma dos isômeros p,p' e o,p';
c) DDT: 2,2-bis (p-clorofenil)-1,1,1-tricloroetano ou diclorodifeniltricloroetano. Este critério se aplica a soma dos isômeros p,p' e o,p';
d) A sete bifenilas correspondem a PCB 28, 52, 101, 118, 138, 153 e 180;
e) Somatória inclui, além dos compostos avaliados: benzo (b) fluoranteno, benzo (k) fluoranteno, benzo (ghi) perileno e indeno (1,2,3 cd) perileno.

Em complementação a caracterização química, deve-se realizar as determinações de Carbono Orgânico Total (COT), Nitrogênio Kjeldahl total (NTK) e Fósforo total (P-total) do sedimento, cujos valores orientadores constantes da Tabela 2.11 contribuem com o critério de disposição, tendo em vista que o excesso desses parâmetros podem causar efeitos adversos de eutrofização de corpos hídricos receptores e ainda que a taxa

carbono:nitrogênio (C:N) pode ser um parâmetro que auxilia no uso agrícola (IADC, 2010).

Tabela 2.11 - Valores Orientadores para Carbono Orgânico Total e Nutrientes (resolução nº 454/12 do CONAMA, BRASIL, 2012)

Parâmetros	Valores de Alerta
Carbono Orgânico Total (%)	10
Nitrogênio Kjeldahl Total (mg/kg)	4800
Fósforo Total (mg/kg)	2000

Nota:

- A critério do órgão ambiental licenciador, o COT poderá ser substituído pelo teor de matéria orgânica.
- Ficam excluídos de comparação os valores oriundos de ambientes naturalmente enriquecidos por matéria orgânica e nutrientes, como manguezais.

A caracterização ecotoxicológica é realizada quando se prevê a disposição em corpo hídrico e quando o sedimento apresentar características químicas cujas concentrações indicam as situações apresentadas na Tabela 2.12.

Tabela 2.12 - Situações químicas do sedimento para a realização dos ensaios de ecotoxicidade (elaborado a partir de resolução nº 454/12 do CONAMA, BRASIL, 2012)

Situação	Substância química	Concentração com referência ao Nível de Classificação da tabela III da res. nº 454/12
1	HAP's do grupo A, arsênio, cádmio, chumbo ou zinco	> nível 1
2	HAP's do grupo B Somatório HAP's (grupo A e B)	Entre nível 1 e 2 > HAP total
3	Qualquer substância da tabela III	> nível 2

Essa caracterização ecotoxicológica, realizada, quando couber, em complementação a caracterização química, refere-se a avaliação dos efeitos das substâncias presentes no sedimento em organismos-testes¹⁰. Esses ensaios envolvem testes biológicos de toxicidade aguda, testes biológicos de toxicidade crônica, testes de bioacumulação e biomarcadores.

Há de se observar que a caracterização ambiental prévia do material a ser dragado será dispensada quando ocorrer em situações de emergência ou calamidade pública, decretadas ou declaradas oficialmente; em áreas com monitoramento regular do sedimento de acordo com os critérios definidos pelo Órgão Ambiental Licenciador

¹⁰ Organismos-teste são espécies consideradas sensíveis aos contaminantes e representativas do ambiente receptor do material dragado.

(OAL); em áreas que não apresentem histórico de contaminação; e quando oriundo de “terras caídas” a margem de rios da região amazônica.

c) CrITÉRIOS para disposiÇÃO do material dragado:

A disposiÇÃO em Águas sob jurisdiÇÃO nacional é possível quando se tratar de material com granulometria maior ou igual a 90% de areia e ainda em situaÇões cuja classificaÇÃO encontram-se dentro das condiÇões descritas na Tabela 2.13, com destaque para as condiÇões que exigem unidade de confinamento, ou seja, quando qualquer substância apresentar valores acima do nível 2 (provável efeito adverso a biota) ou quando apresentar efeito tóxico significativo que corresponde a mais de 50% do efeito tóxico medido.

Tabela 2.13 - Condições e formas recomendadas para a disposiÇÃO do material dragado em AJN (elaborado a partir da resoluÇÃO n° 454/12 do CONAMA, BRASIL, 2012)

Condições de Classificação do sedimento (Tab.III – res. n° 454/12 do CONAMA)	DisposiÇÃO em AJN
Dispensado de classificaÇÃO (art. 4 parágrafo único)	Forma irrestrita (dispersiva ou não)
Qualquer substância \leq Nível 1	
Metais entre Nível 1 e 2	
HAP's (grupo B) entre Nível 1 e 2	
\sum HAP's (grupo A e B) < HAP total	
\sum HAP's (grupo A e B) < HAP total e Análises ecotoxicológicas \leq 50% do efeito tóxico	Forma confinada (cavas, diques, ensacados)
Análises ecotoxicológicas > 50% do efeito tóxico	
Qualquer substância > nível 2	

Vários Estados-Membros da comunidade Europeia defendem que abaixo do nível 1 a disposiÇÃO no mar é permitida, acima do nível 2 é permitida somente em condiÇões muito específicas e entre um nível e outro à disposiÇÃO requer restriÇões, contudo há de se observar os limites estabelecidos pelo país para esses níveis.

Para disposiÇÃO em solo, as concentraÇões das substâncias poluentes contidas na fraÇão total da amostra devem ser comparadas com os valores orientadores estabelecidos

pela resolução nº 420/09 do CONAMA (BRASIL, 2009)¹¹. Esses valores são indicados como:

- Valor de referência da qualidade (VR), cuja concentração de determinada substância define o solo como limpo ou a qualidade natural da água subterrânea.
- Valor de Prevenção (VP), que representa a concentração acima da qual podem ocorrer alterações prejudiciais a qualidade do solo e da água subterrânea.
- Valor de Investigação (VI), que indica a concentração acima da qual existem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana, considerado um cenário de exposição genérico. Para o solo, foram estabelecidos cenários de exposição Agrícola, Residencial e Industrial.

Quando o sedimento é classificado abaixo do Valor de Investigação Residencial (VI_{Res}) o material poderá ser disposto diretamente no solo ou utilizado como aterro hidráulico, e quando acima do Valor de Investigação Industrial (VI_{Ind}) é que se recomenda a destinação do sedimento em aterros licenciados ou em unidades de disposição confinada (UDC). Essas e outras formas de disposição em solo são recomendadas conforme as condições de classificação constantes na Tabela 2.14.

Tabela 2.14 - Condições e formas recomendadas para a disposição do material dragado em solo (elaborado a partir da resolução nº 454/12 do CONAMA, BRASIL, 2012)

Condições de Classificação do sedimento (Anexo II – res. nº 420/09 do CONAMA)	Disposição em solo
< VP	- Diretamente no solo ou como aterro hidráulico ^a
>VP e < VI _{Res}	- Diretamente no solo ou como aterro hidráulico ^a
>VI _{Res} e <VI _{Ind}	- Disposto no solo de forma controlada ^b
>VI _{Ind}	- Unidades de disposição confinada (UDC) - Aterros licenciados

Notas:
a – desde que não existam restrições ambientais e de uso e ocupação do solo
b - em local de uso e ocupação do solo industrial, sem contato com a água subterrânea e sem contato direto com pessoas
VP – Valor de prevenção
VI_{Res} – Valor de Investigação Residencial
VI_{Ind} – Valor de Investigação Industrial

¹¹ A resolução nº 420 de 28.12.2009 do CONAMA dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para gerenciamento ambiental de áreas contaminadas.

O manejo do material dragado deve também observar a resolução nº 430/11 do CONAMA (BRASIL, 2011) que indica as condições de lançamento de efluentes para descarte do líquido proveniente do desaguamento do material.

2.7.5. Valores orientadores e classificação do sedimento por país

A partir da década de 1980 os guias de qualidade do sedimento começaram a ser desenvolvidos com o objetivo de estabelecer valores orientadores relativos às concentrações de contaminantes que causam efeitos adversos no meio biológico aquático.

Esses valores, gerados por meio de diferentes métodos empíricos, são obtidos com a compilação de dados provenientes de diversos locais, tipos e concentrações de contaminantes. Aspectos como fração de amostra analisada e métodos analíticos também são características peculiares de cada banco de dados ¹²

A utilização de dados e métodos de compilação diferenciados conduzem à obtenção de valores orientadores distintos, que geralmente são classificados em dois níveis: aqueles de baixo efeito à biota (nível 1) e os de provável efeito adverso à biota (nível 2), como é o caso do Brasil, EUA e Canadá. Países como Holanda e Alemanha apresentam uma classificação em quatro classes: limpo (Classe 1), com vestígio de contaminação (Classe 2), levemente contaminado (Classe 3) e contaminado (Classe 4).

Os valores orientadores de metais/metaloídeos e seus níveis de classificação de alguns países são apresentados na Tabela 2.15. Contudo, ressalta-se que valores específicos costumam ser utilizados em estados/regiões onde características próprias do local são consideradas.

¹² O banco de dados do Estatuto Nacional e Programa de Tendências (NSTP) criado em 1990 pelo NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) e o Banco de dados dos efeitos biológicos para sedimentos (BEDS - *Biological Effects Database for Sediments*) desenvolvido com acréscimo de dados relativos a estudos canadense são exemplos de fontes utilizadas para determinação dos valores orientadores nos EUA e Canadá.

Tabela 2.15 - Valores orientadores de metais e metalóides para sedimento de águas salinas/ salobras (elaborado a partir de Bray, 2008)

País	Níveis de classificação	Concentração do parâmetros em mg/kg							
		Arsênio (As)	Cádmio (Cd)	Chumbo (Pb)	Cobre (Cu)	Cromo (Cr)	Mercurio (Hg)	Níquel (Ni)	Zinco (Zn)
Brasil	Nível 1	19	1,2	46,7	34	81	0,3	20,9	150
	Nível 2	70	7,2	218	270	370	1	51,6	410
Canadá	TEL	6	0,6	31	16	26	0,2	16	120
	PEL	33	10	250	110	110	2	75	820
EUA	ERL	8,2	1,2	46,7	34	81	0,15	20,9	150
	ERM	70	9,6	218	270	370	0,71	51,6	410
Portugal <63µm	Classe 1	20	1	50	35	50	0,5	30	100
	Classe 2	50	3	150	150	100	1,5	75	600
	Classe 3	100	5	500	300	400	3	125	1500
	Classe 4	500	10	1000	500	1000	10	250	5000
Espanha	Nível 1	80	1	120	100	200	0,6	100	500
	Nível 2	200	5	600	400	1000	3	400	3000
França	Nível 1	25	1,2	100	45	90	0,4	37	276
	Nível 2	50	2,4	200	90	180	0,8	74	552
Bélgica	Nível 1	20	2,5	70	20	60	0,3	70	160
	Nível 2	100	7	350	100	220	1,5	280	500
Holanda	Classe 1	29	0,8	85	36	100	0,3	35	140
	Classe 2	55	2	530	36	380	0,5	35	480
	Classe 3	55	7,5	530	90	380	1,6	45	720
	Classe 4	55	12	530	190	380	10	200	720
Alemanha <20µm	Classe 1	10	90	50	40	90	0,5	40	150
	Classe 2	40	150	150	150	150	5	150	500
	Classe 3	70	250	250	250	250	10	250	1000
	Classe 4	100	500	500	500	500	25	500	2000
Irlanda	Nível 1	10	1	50	50	100	0,3	50	400
	Nível 2	80	3	400	200	300	5	200	700
Reino Unido	Nível 1	20	0,4	50	40	40	0,3	20	130
	Nível 2	70	2	500	400	400	3	200	800
Finlândia	Nível 1	15	0,5	40	50	65	0,1	45	170
	Nível 2	60	2,5	200	90	270	1	60	500
China - Hong Kong	Nível 1	12	1,5	75	65	80	0,5	40	200
	Nível 2	42	4	110	110	160	1	40	270
Coréia do Sul	Nível 1	20	2,5	50	65	80	0,3	35	200
	Nível 2	70	10	220	270	370	1,2	52	410

2.8. ESTUDOS AMBIENTAIS PARA ATIVIDADE DE DRAGAGEM

Segundo Bray (2008) a atividade de dragagem possui aspectos que podem gerar impactos ambientais na água, no solo, no ar e na condição socioeconômica. Outros autores (Manap & Voulvoulis, 2016); alertam que as etapas de escavação, transporte e destinação do material dragado provocam alteração no ambiente e interferem, especialmente, na fauna e flora aquática.

Diante do potencial de impacto, a atividade de dragagem geralmente necessita de estudo específico para obtenção da licença ambiental. A resolução nº 01/86 do CONAMA descreve que o estudo de impacto ambiental deve conter (BRASIL, 1986):

- Objetivos e justificativas do projeto, sua relação e compatibilidade com as políticas setoriais, planos e programas governamentais;
- Descrição do projeto e suas alternativas tecnológicas e locacionais, especificando os processos e técnica operacionais, com indicação de matérias primas, mão-de-obra, fontes de energia, bem como os prováveis efluentes, emissões e resíduos a serem gerados;
- Diagnóstico ambiental da área de influência do projeto com descrição e análise dos recursos ambientais e suas interações, considerando o:
 - meio físico – com detalhamento do solo, das águas, do ar e o clima;
 - meio biológico - com detalhamento da fauna e a flora;
 - meio antrópico - destacando o uso e ocupação do solo e água, os sítios e monumentos arqueológicos, históricos e culturais e as características socioeconômica da sociedade local;
- Identificação e análise dos impactos ambientais positivos e negativos nas etapas de implantação e operação do projeto e de suas alternativas, considerando características de magnitude, importância, duração, frequência, reversibilidade, propriedades cumulativas e sinérgicas, dentre outras definidas por metodologias de avaliação dos impactos;
- Definição das medidas de controle e mitigação dos impactos negativos, com identificação de equipamentos e sistemas de tratamento;
- Programas de acompanhamento e monitoramento dos impactos positivos e negativos.

Entretanto, alguns estados brasileiros possuem instruções normativas específicas que permitem licenciamento com estudo e processos diferenciados, tendo em vista as características de porte e potencial poluidor da atividade.

2.8.1. Elementos do diagnóstico ambiental

O diagnóstico dos aspectos físicos, biológicos e antrópicos são legalmente exigidos no licenciamento de atividade potencialmente impactantes. Quando se trata da atividade de dragagem, Bray et al. (1997) alertam que estudos específicos devem ser realizados para se obter parâmetros essenciais ao planejamento da dragagem e seleção dos métodos de escavação, transporte e disposição. Dentre esses estudos destacam-se:

- Estudos meteorológicos para conhecimento da precipitação e padrões de vento, os quais podem afetar a operação;
- Estudos hidrodinâmicos para compreender as marés e correntes;
- Levantamentos batimétricos para definir profundidade, perfil geométrico e volume a ser dragado;
- Caracterização geoquímica e geotécnica para determinar a natureza dos materiais nos locais de dragagem e descarte.

2.8.2. Possíveis impactos ambientais

Estudos ambientais realizados para a atividade de dragagem, geralmente, indicam os possíveis impactos sob a ótica antrópica, física e biológica. Considerando a verificação de alguns estudos de impactos ambientais utilizados no licenciamento ambiental desta atividade e embasado nas abordagens de Bray (2008), do Australian Government (2009) e Manap & Voulvoulis (2016) foi possível listar possíveis impactos para os meios antrópico, físico e biológico, conforme se verifica na Tabela 2.16.

Tabela 2.16 – Possíveis impactos ambientais para atividade de dragagem (elaborado pelo autor)

MEIO	POSSÍVEIS IMPACTOS AMBIENTAIS
Antrópico	Geração de expectativas da população Perspectivas de geração de emprego e de interferência e/ou restrição de áreas de pesca e navegação.
	Geração de emprego Contratação ou manutenção de postos de trabalho na empresa de dragagem e em empresas de suporte a atividade, inclusive no caso de beneficiamento para uso benéfico do material.
	Geração de tributos e dinamização da economia Fornecimento de bens e serviços diretos para suprimento da operação de dragagem, promovendo circulação de mercadorias e serviços com conseqüente arrecadação de impostos
	Interferência sobre a atividade pesqueira/ turística e ao uso do espaço marítimo
	Interferência sobre o tráfego de embarcações e transporte terrestre
Físico	Alterações na água Interferência nos padrões de qualidade da água, em especial nos parâmetros de turbidez devido à ressuspensão e dispersão de sedimentos finos (argila e silte) para a coluna d'água, e liberação dos contaminantes contidos nos sedimentos. Interferência ainda nas correntes e fluxo de água devido a nova batimetria local.
	Alterações no solo Mudanças físicas referente à batimetria, estrutura, textura e granulometria do solo, bem como mudanças químicas devido à ressuspensão do sedimento com liberação/dispersão de contaminantes. No caso de disposição no solo devem-se observar ainda os critérios de uso e ocupação, alteração da topografia e/ou linha de costa.
	Geração de ruídos e alteração na qualidade do ar Provenientes da embarcação (draga), com suas máquinas a combustão e outros equipamentos. No ambiente aquático, o ruído pode promover uma alteração comportamental (fuga) de espécies.
	Risco de acidentes ambientais Risco de derramamento de óleo, lançamento inadequado de sedimento, incêndios, explosões e outros acidentes que possam provocar distúrbio no ambiente.
	Disponibilização de novo materiais Materiais dragados destinados para uso benéfico
	Eliminação e/ou soterramento de ambientes e da biota aquática No processo de dragagem ocorre a remoção/eliminação do ambiente de fundo e na disposição do material dragado pode ocorrer o soterramento da biota.
Biológico	Exposição da biota a sedimentos contaminados A pluma de sedimento em suspensão formada no processo de dragagem e disposição pode promover a dispersão de materiais contaminados para a biota, onde os organismos filtradores como moluscos poderão absorver esses contaminantes.
	Interferências sobre unidades de conservação e área protegidas

2.8.3. Relação de medidas de controle e mitigação dos impactos

Para reduzir e controlar os impactos da etapa de retirada e de disposição dos sedimentos, o Guia de Avaliação Nacional para Dragagem (USACE, 2004), indica:

- Procedimentos de manuseio e uso de equipamentos para reduzir a geração e dispersão das plumas de turbidez, como é o caso do emprego das telas de silte detalhadas por Radermacher (2013) e Li et al. (2018);
- Mudança de local e/ou tempo de retirada e disposição para evitar ou reduzir impactos sobre comunidades bentônicas sensíveis e respeitando fases críticas do ciclo de vida, tais como períodos de desova, e migração de animais marinhos;

- Tratamento do material dragado para redução dos contaminantes.
- Monitoramento constante da área de retirada e disposição do material.

2.8.4. Listagem de programas de acompanhamento e monitoramento

Dentre os programas ambientais de monitoramento das atividades de dragagem os estudos ambientais usualmente abordam:

- Programa de controle da poluição, com indicação de equipamentos, medidas e procedimentos necessários para minimização dos impactos;
- Programa de comunicação social e de educação ambiental.
- Programa de gerenciamento de riscos com plano de ação de emergência - PAE
- Programa de monitoramento da atividade, com objetivos de verificar:
 - Qualidade dos sedimentos
 - Qualidade da água de fundo e da coluna d'água
 - Pluma de dispersão do material dragado
 - Comunidades demersais bentônicas
 - Interferências sobre a atividade pesqueira

2.9. CONCLUSÕES PARCIAIS

O entendimento de conceitos, objetivos, tipos e equipamentos utilizados na atividade de dragagem são importantes para planejamento e condução adequada das etapas de escavação, transporte e destinação do material dragado.

As formas de destinação do material dragado e as respectivas normas regulamentadoras abordadas permitem ampliar o conhecimento e contribuem com a aplicação de alternativas ambientalmente adequadas a novos projetos de dragagem.

Embora instruções normativas estaduais permitam licenciamento ambiental com estudos e processos diferenciados em função do porte e potencial poluidor da atividade, importantes elementos são sugeridos para contemplação nos estudos ambientais.

3. DISPOSIÇÃO CONFINADA EM SISTEMA GEOTÊXTIL FECHADO

Os geossintéticos são constituídos por materiais poliméricos aplicados em projetos de engenharia com a função de proteção, controle de erosão, impermeabilização, reforço, drenagem, separação e filtração, dentre outras aplicações. Com base no processo de fabricação, composição e formato, os geossintéticos podem ser classificados em diversos produtos (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Classificação dos Geossintéticos (Vertematti, 2015).

Produto	Descrição
Geotêxtil	São mantas flexíveis e permeáveis formadas por fibras ou filamentos tecidos e não tecidos.
Geogrelha	São utilizados para reforço de solos na forma de grelhas extrudadas, soldadas ou tecidas.
Geóide	São formados por duas séries de membros extrudados paralelos, que se interceptam em ângulo constante e são utilizados para conduzir elevadas vazões de fluidos ou gases.
Geomembrana	São mantas contínuas e flexíveis que possuem baixíssima permeabilidade e são usadas como barreiras para fluidos, gases ou vapores.
Geocomposto	São formados pela associação de dois ou mais tipos de geossintéticos ou outros produtos combinados para função específica. Exemplos: Geocomposto argiloso (GCL) e geodrenos
Geotubo	São tubos poliméricos perfurados ou não, usados para drenagem de líquidos ou gases.
Geocélula	São constituídos por tiras poliméricas que formam arranjos tridimensionais, relativamente espessos, gerando células para serem preenchidas com solo e, às vezes, concreto.
Geoexpandido	São blocos ou placas produzidos por meio da expansão de espuma de poliestireno para formar uma estrutura de baixa densidade. É utilizado para isolamento térmico e para reduzir pressões de solo sobre muros rígidos.

Dentre os produtos geossintéticos observados na Tabela 3.1 encontra-se o geotêxtil formado por fibras de polipropileno, poliéster ou polietileno, cujo arranjo estrutural pode ser do tipo tecido¹³ ou não tecido¹⁴.

¹³ Tecido é uma manta com estrutura plana, flexível e porosa, formada pelo entrelaçamento ordenado de fios ou filamentos que se cruzam em ângulos definidos.

¹⁴ Não-tecido é uma manta de estrutura plana, flexível e porosa, constituída por fibras ou filamentos orientados ou ao acaso e consolidados por processo mecânico (agulhado), químico (resinado), térmico (fusão parcial) ou combinações desses (ABNT NBR, 2017).

As fibras sintéticas, fabricadas nos anos 40, passaram a ser componentes de mantas geotêxteis a partir da década de 1950, especificamente em 1953, quando uma inundação catastrófica na Holanda forçou pesquisadores a buscar alternativas para remediação e então a fábrica Nicolon B.V. iniciou uma linha de tecidos industriais (Monteiro, 2010). Em 1958, a fábrica de tecido alemã Huesker também inicia a fabricação de tecidos sintéticos e começou a produzir filtros têxteis e bolsas de areia. Nos Estados Unidos em 1960 foi criada a primeira indústria específica para tecidos tecnológico, a Mirafi, cujo nome surgiu da união da versão em inglês de fibras milagrosas, ou seja, *miracle fibers*. Em 1991 a Nicolon e a Mirafi uniram forças e tornaram uma divisão da empresa TenCate instalada no estado da Geórgia nos EUA

As primeiras utilizações dessas mantas geotêxteis no mundo datam da década de 1960 como elementos de filtro para obras hidráulicas e para controle de erosão marítima na Holanda, Estados Unidos, Alemanha Ocidental e Japão (BARRETT, 1966; TENCATE, 2013)

O uso de sistema geotêxtil fechado (tubos e bolsas) teve início na década de 1970, com o propósito inicialmente estrutural em obras costeiras e a partir da década de 1980 começa a ser utilizado para contenção de sedimentos dragados (PIEPER, 2008).

Nos EUA os primeiros usos de tubos geotêxteis para desaguamento da dragagem de sedimentos finos contaminados foram conduzidos pela autoridade portuária de Nova York e Nova Jersey, pelo Miami River Marine Group e pelo Porto de Oakland. A partir da década de 1990 esses tubos geotêxteis começaram a ser fabricados sobre encomenda e na mesma época passaram a utiliza-los para desidratar lamas de tratamento de esgoto.

Devido à pouca orientação de projeto e construção a USACE patrocinou em agosto de 1995 no Texas a primeira oficina sobre o tema envolvendo empreiteiros de dragagem, fabricantes dos tubos, consultores, diretores portuários e professores (HOWARD, 2011).

No Brasil, há registro da fabricação pioneira do geotêxtil não tecido de poliéster na década de 1970. E na década de 1980 inicia a aplicação de fôrmas têxteis tubulares, cujo primeiro teste de preenchimento hidráulico com areia foi realizado em São Luiz no Maranhão (Vertematti, 2015). A primeira grande obra brasileira de contenção de

sedimento contaminado em tubo geotêxtil foi realizada na dragagem do Canal do Fundão no Rio de Janeiro em 2009. Desde então, essa técnica de desaguamento e acondicionamento de sedimentos contaminados tem sido utilizada nas obras de dragagem do estaleiro e base naval de Itaguaí na Baía de Sepetiba - RJ (300 mil m³), do terminal Embraport em Santos-SP (580 mil m³), do Tiplam em Santos - SP (500 mil m³), do porto do rio para ilha de Pombeba - RJ (30 mil m³) e do terminal da General Eletric Oil & Gas em Niterói - RJ (45 mil m³) (Stephens et al, 2011; Melo et al, 2012, Stephens, 2013; Stephen et al, 2013).

Atualmente, além da utilização para retenção de material dragado, essa tecnologia de sistema geotêxtil fechado tem crescido exponencialmente nos últimos anos podendo ser empregada de pequenas a grandes instalações, e vem sendo adotada para desidratar uma variedade de materiais semelhantes aos sedimentos dragados, como os resíduos de mineração, lodos do tratamento de água e esgoto e resíduos agrícolas (LAWSON, 2008 e MAURER et al., 2012).

Atenta ao uso desta tecnologia para desaguamento de lodo de estação de tratamento de água e esgoto a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo elaborou uma norma técnica específica (SABESP, 2015).

3.1. CONFINAMENTO EM SISTEMA GEOTÊXTIL FECHADO

A utilização de material confinado formando estrutura do tipo *rip rap*, tais como sacos de areia e sacos de solo-cimento, tem sido utilizado durante muitos anos como sistema de estabilização de talude e como barreira temporária contra enchentes.

Essa técnica aliada as propriedades mecânicas e hidráulicas das mantas geotêxteis conduziram à fabricação do denominado sistema geotêxtil fechado que possibilita o confinamento de material sólido e desaguamento de alto teor de líquido. Vertematti (2015) nomeou esse produto geossintético como reforma e o classificou como fôrmas têxteis tubulares, cúbicas e planas. Bezuijen & Vastenburger (2013) e Smith (2017) indicam que, em função do formato, o sistema geotêxtil fechado pode ser definido como: tubos, containers, bolsas e matrizes geotêxteis, cujas características são apresentadas a seguir.

3.1.1. Tubos Geotêxteis

Devido ao seu formato inicialmente cilíndrico, os tubos geotêxteis são conhecidos também como fôrmas têxteis tubulares (FTT) e popularmente chamados de salsichões (Vertematti, 2015). Geralmente apresentam seção transversal elíptica após o enchimento e ao longo de seu comprimento possui orifícios denominados de mangas que recebem o material a ser confinado (Figura 3.1).

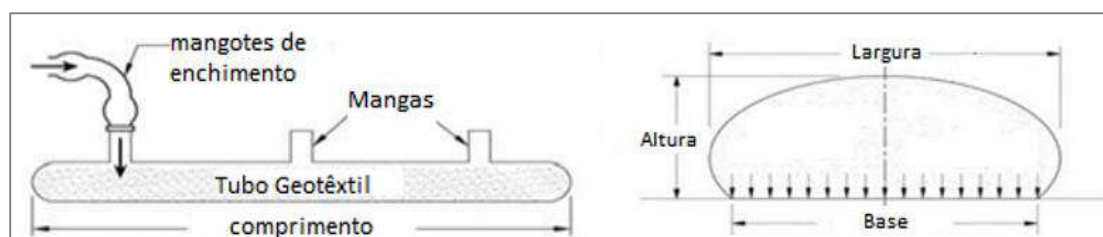


Figura 3.1 - Perfil longitudinal e transversal típicos de um tubo geotêxtil (Lawson, 2008)

Os tubos geotêxteis são fabricados com diâmetros teóricos que variam de 0,5 a 5,0 m e comprimento típico de 20 a 30 m, podendo chegar a 100 m (BEZUIJEN; VASTENBURG, 2013). Na prática, um ou mais rolos da manta geotêxtil são costurados nos extremos laterais de acordo com as necessidades do projeto. Desta forma, o perímetro do tubo atinge valores múltiplos da largura padrão dos rolos do geotêxtil que geralmente se situam na faixa de 4,5 a 5,3 m. Assim, permite-se gerar tubos com circunferência próximas de 9m, 13,5m e 18m (Ortiz, Junior & Ladchumananandasivam, 2003).

Os tubos são construídos a partir de geotêxtil tecido ou não tecido, que apresentam uma resistência à tração final na faixa de 60 a 120 kN/m e uma abertura de filtração (diâmetro do poro) $\leq 400 \mu\text{m}$ (Smith, 2017). Ao pesquisar os cinco fabricantes de tubos geotêxteis dos Estados Unidos, Howard (2011) observou que o preço do produto (excluindo o frete) varia devido uma gama de fatores, e em 2009 situavam-se entre US\$ 62,00 a US\$ 213,00 por metro, dependendo da circunferência do tubo.

3.1.2. Containers Geotêxteis

São fabricados com um propósito específico e dimensionados para atender uma barcaça que conduzirá o material para disposição. A capacidade de volume varia de 100 a 700 m³ e suas dimensões estão limitadas ao interior da barcaça que apresentam comprimento típico de até 25m (Smith, 2017).

A resistência a tração do conjunto costura e geotêxtil deve ser alta para suportar inclusive o impacto de assentamento no fundo após lançamento da barça. Essa resistência a tração em geotêxteis tecidos pode ser de 600 kN/m ou mais, enquanto que os não tecidos são limitados a 70 kN/m, embora ofereçam maior deformação específica e maior resistência a abrasão (Smith, 2017).

3.1.3. Bolsas Geotêxteis

As bolsas ou sacos geotêxteis são fabricados em material tecido ou não tecido com uma extremidade deixada em aberto para fechamento em campo após o enchimento. O volume da bolsa varia de 0,05 a 5 m³ e pode ter forma de travesseiro conforme a aplicação (Smith, 2017). O Manual Brasileiro de Geossintético nomeia essas bolsas como fôrmas texteis cúbicas (FTC) e internacionalmente são conhecidas como *Geobags* (Vertematti, 2015).

3.1.4. Matrizes Geotêxteis

As matrizes geotêxteis são também chamadas de fôrmas têxteis planas (FTP) e apresentam formatos de colchões ondulados cuja espessura atinge uma média de 60 cm (Bezuijen & Vastenburg, 2013 e Vertematti, 2015).

3.2. PROPRIEDADES PARA DIMENSIONAMENTO DO SGF

No tubo geotêxtil com disposição terrestre o processo de redução da umidade e consequente aumento no teor de sólidos é realizado com base nos mecanismos de filtração (retenção de sólidos e passagem do líquido), adensamento (expulsão de água com redução do índice de vazios) e secagem (eliminação de líquido por meio da evaporação).

Vidal e Urashima (1999) discorrem que esses mecanismos são influenciados pelas propriedades do geotêxtil, propriedades do material de enchimento e pelas condições de solicitações do sistema.

3.2.1. Propriedades do geotêxtil

Os testes de caracterização dos produtos geotêxteis são estabelecidos por associações normatizadoras, tais como ABNT, ASTM, AFNOR e outras. O Instituto de pesquisa sobre geossintético (GRI – *Geosynthetic Research Institute*) e a Organização Internacional para Padronização (ISO – *International Organization for Standardization*) também tem desenvolvido novos procedimentos em seus grupos de trabalho para se determinar as propriedades físicas, hidráulicas, mecânicas e de durabilidade que permitem a caracterização dos geotêxteis.

Assim, as propriedades de uma manta geotêxtil envolvem a definição de gramatura, espessura, abertura de filtração, permeabilidades normal e longitudinal, capacidade de fluxo, resistência a tração, resistência ao puncionamento, capacidade de alongamento, resistência à luz ultravioleta e a oxidação (Pieper, 2008).

A **gramatura** (μ) dos geotêxteis, que equivale a massa por unidade de área, é determinada de acordo com a ABNT NBR ISO 9864:2013 e apresenta valores típicos variando entre 100 e 900 g/m² (Robeck, 2015).

A **espessura** (t) dos geotêxteis é determinada de acordo com a norma brasileira ABNT NBR ISO 9863-1:2013 e varia tipicamente de 0,2 a 10 mm, dependendo do produto (Silva, 2014).

A **porosidade** (ε) do geotêxtil não é medida de forma direta, sendo calculada em função da gramatura (μ), espessura (t) e a massa específica (ρ) do geotêxtil, conforme equação 3.1 estabelecida por Koerner (2012).

$$\varepsilon = 1 - \frac{\mu}{\rho \cdot t} \quad 3.1$$

Além desses, os parâmetros de maiores interesses em sistemas geotêxteis fechados são: abertura de filtração, permeabilidade, resistência a tração e os critérios de durabilidade.

A **abertura de filtração** (O_f), expressa em μm , é definida como a abertura equivalente ao diâmetro da maior partícula que passa através dos poros da manta

geotêxtil. O termo empregado na definição desse parâmetro varia em função do país e do processo de obtenção, podendo ser: AOS (*Aparent Opening Size*), FOS (*Filtration Opening Size*), O_{90} ou O_{95} .

O valor comumente utilizado é o O_{95} , que correspondente à abertura da peneira pela qual passa 95% da massa total do material (Silva, 2014). No Brasil, o ensaio para determinação dessa propriedade é definido pela ABNT NBR ISO 12.956/2013 como o peneiramento por via úmida, onde se obtém O_{90} .

De acordo com Vidal & Urashima (1999) o geotêxtil tecido apresenta poros praticamente com a mesma forma e dimensão, enquanto que o não tecido tem maior variação dos poros e complexa trajetória ao longo da espessura do geotêxtil. O Instituto de Geossintético, por meio do GT 10, indica uma abertura de filtração máxima de 0,425 mm para tubos geotêxteis (GSI, 2012).

O **coeficiente de permeabilidade** do geotêxtil (K_n) permite avaliar a passagem do líquido através do meio filtrante. Em geral, esse fluxo é bem elevado e a norma ABNT NBR ISO 11.058/2013 possibilita determinar a permeabilidade em função do gradiente hidráulico e velocidade de fluxo. De acordo com Koerner (2012) a permeabilidade dos geotêxteis encontra-se entre 8×10^{-6} e 2×10^{-3} m/s, a depender do tipo de polímero, gramatura, etc.

Considerando que esforços normais aplicados ao geotêxtil provocam compressibilidade com conseqüente redução na espessura da manta, especialmente em não tecidos, utiliza-se o **coeficiente de permissibilidade** (ψ) como o melhor parâmetro por correlacionar a permeabilidade com a espessura do geotêxtil sob determinada tensão física no sentido transversal. Os valores de permissividade dos geotêxteis variam de 0,02 a $2,2 \text{ s}^{-1}$ (Koerner, 2012).

A **capacidade de fluxo no plano**, determinado por meio da ABNT NBR ISO 12958/2013, é expressa em L/(m.s) e indica o volume de fluido que passa no plano por unidade de largura em certo segundo, para cada tensão normal e gradiente hidráulico. O Instituto de Geossintético, por meio do GT 10, indica que tubos geotêxteis apresentam uma taxa de fluxo da água mínima de 240 l/min/m^2 (GSI, 2012).

A **resistência à tração e deformação**, responsáveis por permitir carga, dependem consideravelmente do tipo de polímero de composição da manta geotêxtil. As mantas constituídas por polietileno são capazes de apresentar maior resistência a tração, porém com menor capacidade de deformação. Comportamento contrário apresentam as mantas de poliéster (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 - Resistência à tração e deformação do geotêxtil em função da composição (Bezuijen & Vastenburg, 2013)

Composição do Geotêxtil	Resistência a Tração (kN/m)	Deformação máxima (%)
Poliéster (PE)	20 a 50	20 a 30
Polipropileno (PP)	40 a 300	10 a 15
Polietileno (PET)	100 a 1600	8 a 15

O arranjo estrutural da manta também interfere nesses parâmetros, haja vista que os geotêxteis tecidos geralmente apresentam uma tração relativamente alta e uma baixa capacidade de deformação, enquanto que os geotêxteis não tecidos têm uma resistência à tração relativamente baixa e uma deformação elevada.

Com relação aos critérios mecânicos, o Instituto de Geossintético, por meio do GT 10, recomenda que os tubos geotêxteis em condições agressivas apresentem características mínimas de 105 kN/m para tensão de tração da costura, 1,8 kN para tensão de punção e um alongamento máximo de 15% (GSI, 2012).

A carga máxima em um sistema geotêxtil depende da resistência de sua costura, e essa representa 30 a 80% da tensão de tração da manta geotêxtil, que deve ser suficiente para resistir às cargas transmitidas durante o enchimento, transporte e disposição de sistema geotêxtil fechado, especialmente no caso de disposição aquática de forma ensacada (Figura 3.2).

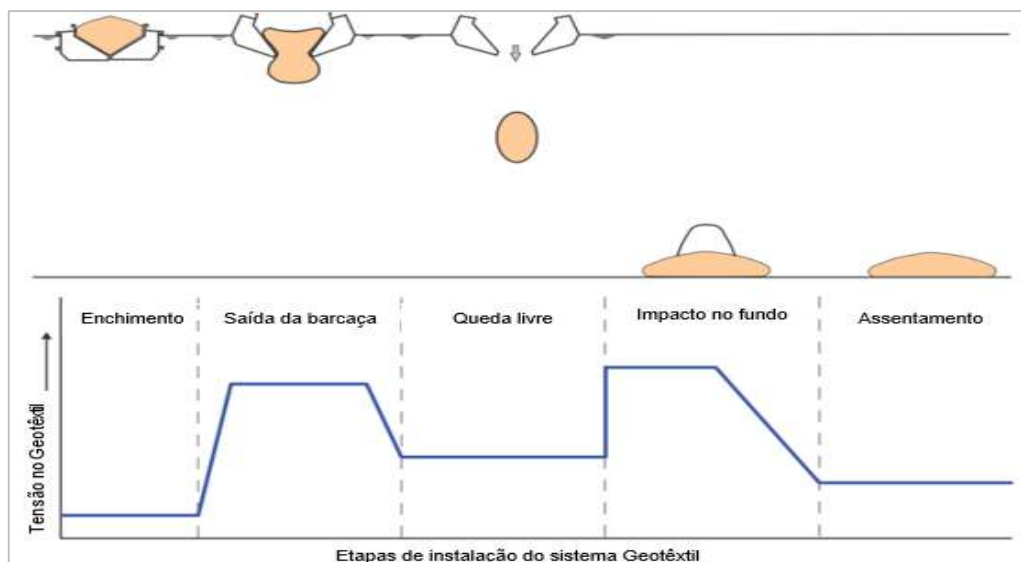


Figura 3.2 – Tensão no geotêxtil em etapas de instalação aquática do sistema fechado (Lawson, 2008)

As questões de **durabilidade**, que vão definir a vida útil do geotêxtil, estão relacionadas aos efeitos da radiação ultravioleta, exposição química e biológica, incluindo oxidação e hidrólise, bem como os danos mecânicos, abrasão e deformação. Para aferir esse quesito existem normas para os ensaios de: resistência à abrasão, que determina perda de material por tempo decorrido, fluência para verificar o tempo de deformação até ruptura sob carga constante, resistência a agentes químicos e biológicos com imersão em substância química e inoculação de bactérias e resistência aos raios ultravioleta com exposição a essa fonte de radiação.

De acordo com Greenwood, Schroeder e Voskamp (2016) espera-se uma vida útil de mais de 25 anos para os geossintéticos. Estes autores lembram que os produtos de reforço são normalmente produzidos para uma vida útil de pelo menos 100 anos e pode-se alcançar 120 anos quando aditivos¹⁵ são misturados no polímero durante a extrusão para fabricação da manta.

3.2.2. Propriedades do material de enchimento

A granulometria do material de enchimento interfere no processo de filtração com geotêxtil. Vidal & Urashima (1999) apresentam o comportamento da filtração para

¹⁵ O negro-de-carbono, conhecido como nego-de-fumo é um aditivo comumente utilizado como estabilizador térmico contra as radiações UV na proporção de 2 a 3% (ROBECK, 2015).

material de enchimento com características uniforme, bem graduado e de graduação aberta (mal graduado e não uniforme), conforme se observa na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Comportamento da filtração com relação à graduação do material (adaptado de Vidal & Urashima, 1999)

Classificação do Material	Comportamento	Ilustração
graduação uniforme	fluxo no mesmo sentido da gravidade faz com que as partículas tendam a formar arco sobre o poro do geotêxtil estabilizando o sistema.	
	fluxo no sentido contrário a gravidade pode provocar perda contínua de partículas.	
bem graduado	forma um pré-filtro em contato com o geotêxtil, pois as partículas maiores bloqueiam a passagem e retêm as menores.	
não uniforme e mal graduado	permite a passagem livre de partículas mais finas através da estrutura do solo, podendo apresentar o efeito da sufusão (derramamento de fluido).	

Para sedimento de dragagem, experiências relatadas (CASTRO, 2005; TOMINAGA, 2010) mostram que inicialmente ocorre perda de partículas através do geotêxtil, mas rapidamente essa perda vai diminuindo devido à formação de pré-filtro. Afinal, partículas em suspensão, principalmente as muito finas, podem gerar a colmatação (*filter cake*) do geotêxtil, o que aumenta a capacidade filtrante de retenção do sólido e diminui a permeabilidade do líquido. As partículas mais grossas são depositadas no fundo conforme se observa na Figura 3.3.

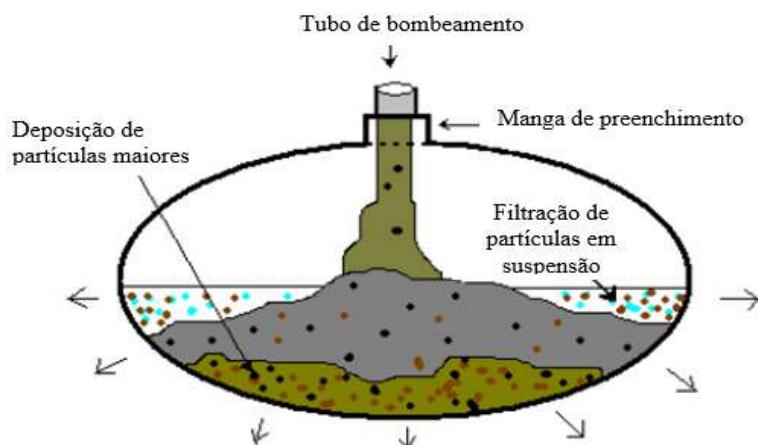


Figura 3.3 - Zonas de deposição do material durante o bombeamento (Castro, 2005)

Estudos de Liao & Bhatia (2005), sobre a filtração em tubos geotêxteis, concluem que o alto teor de água no sedimento parece diminuir a eficiência de filtração de grãos finos e acrescentam que a pressão variando de 7 kPa a 70 kPa tem pouco efeito sobre a eficiência da filtração, mesmo que representem maiores taxas de fluxo.

Em se tratando de sistemas geotêxteis fechados, o material de enchimento costuma receber a adição de polímero para coagulação das partículas finas e formação de flocos, permitindo maior retenção do material sólido e aumento da taxa de fluxo do líquido.

3.2.3. Solicitações hidráulicas do sistema

Os parâmetros básicos necessários para o dimensionamento hidráulico de geotêxteis que atuam como filtro são: o critério de permeabilidade, o critério de retenção e o critério anti-colmatação. A durabilidade também deve ser avaliada para garantir a vida útil desejada ao sistema (CHRISTOPHER e FISCHER, 1992).

3.2.3.1. Critério de Permeabilidade

O Critério de Permeabilidade é baseado no princípio de que o geotêxtil deve ter uma permeabilidade suficientemente alta para permitir a livre passagem de líquido, sem causar sobrepressão (Vertematti, 2015).

Algumas metodologias mais conservativas e sem fator de segurança baseiam-se no argumento de que o geotêxtil não precisa ser mais permeável do que o solo que ele retém, pois é esperado que o fluxo não seja impedido na interface solo/geotêxtil se as

permeabilidades forem pelo menos iguais. No entanto, uma relação empírica comumente utilizada é que a permeabilidade do geotêxtil deve ter um fator 10 vezes maior do que a permeabilidade do solo. Outros critérios propostos na literatura discutem o fator de relação entre a permeabilidade do geotêxtil (K_n) e a permeabilidade do solo de enchimento (K_s) tendo em vista a aplicação, conforme indicado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Critérios de permeabilidade e permissividade para o geotêxtil (adaptado de Bezuijen & Vastenburg, 2013)

Critério	Aplicação	Autores
$K_n \geq K_s$	Fluxo estacionário Condições não severas Sem fator de segurança	Calhoun (1972), Carroll (1983), Christopher & Holtz (1985), Girould (1982)
$K_n \geq 10 K_s$	Condições mais severas de solo ou hidráulica Tecidos e não tecidos finos ($t \leq 2$ mm)	Carroll (1983), Christopher & Holtz (1985), Corbet (1993)
$K_n \geq 20 K_s$	Solos não coesivos	Lafleur (1999)
$K_n \geq 100 K_s$	Geotêxtil não tecido espesso ($t > 2$ mm)	Corbet (1993)
$\Psi \geq 10^{3 \text{ a } 5} K_s$	Areias Limpas ($10^3 K_s$) Situação menos crítica ($10^4 K_s$) Situação crítica ($10^5 K_s$)	Comitê Francês de Geotêxteis e Geomembranas – CFGG (1986)

Nota:
 K_n = Coeficiente de permeabilidade normal do Geotêxtil
 K_s = Coeficiente de permeabilidade do solo
 Ψ = permissividade do geotêxtil

Vidal & Urashima (1999) relatam que o coeficiente de permeabilidade do solo retido (K_s) no tubo geotêxtil varia em função do modo de disposição das partículas, da posição no tubo e do tempo de desaguamento. A condição mais crítica é no início do bombeamento e no topo do tubo onde ocorre filtração das partículas em suspensão. As maiores cargas hidráulicas ocorrem na base, mas com a rápida deposição de partículas o fluxo passa a ser condicionado por esse material. Assim, recomenda-se a Equação 3.2.

$$\left(\frac{Kn}{t}\right) \Delta h x a \geq Q \quad (3.2)$$

Onde:

K_n = coeficiente de permeabilidade normal do Geotêxtil (cm/s)

t = espessura do Geotêxtil (cm)

Δh = Carga hidráulica (em cm de coluna d'água)

a = área de filtração (cm²)

Q = vazão de entrada (cm³/s)

3.2.3.2. Critério de Retenção

O Critério de Retenção garante que o geotêxtil terá abertura de filtração necessária para permitir a retenção dos sólidos, embora seja aceitável a migração de uma pequena porcentagem de partículas.

Vários critérios de retenção tem sido propostos na literatura para relacionar o diâmetro característico do solo (D_s) e o tamanho da abertura de filtração do geotêxtil (O_f). Alguns desses critérios estão na Tabela 3.5 e parte refere-se a filtragem de solos estruturados.

Tabela 3.5 - Critérios de retenção para o geotêxtil (adaptado de Palmeira e Gardoni, 2000 citado por Silva, 2014)

Critério (mm)	Aplicação	Autores
$O_{95}/D_{85} \leq 1$ $O_{95} \leq 0,2$	Geotêxtil tecido e solo com $\leq 50\%$ passando # 200 Geotêxtil tecido e solos coesivos	Calhoun (1972)
$O_{90}/D_{90} \leq 1$ $O_{95}/D_{85} \leq 1,8$	Geotêxtil tecido Geotêxtil não tecido	Ogink (1975)
$O_{50}/D_{85} \leq 1$	Geotêxtil tecido e não tecido	Millar, Ho & Turnbull (1980)
$O_{95}/D_{85} \leq 2$ a 3	Geotêxtil tecido e não tecido	Corbet (1993)
$O_{95}/D_{85} \leq 1$ a 2 $O_{95}/D_{15} \leq 1$ ou $O_{50}/D_{85} \leq 0,5$	Dependendo do tipo de solo e de coef. uniformidade Fluxo dinâmico, pulsante e cíclico, se o solo pode mover para o filtro geotêxtil	Christopher & Holtz (1985)
$O_{90}/D_{90} = 1$ a 3 $O_{90}/D_{90} < 1$ a 3 $O_{90}/D_{50} < 1,8$ a 6	tecidos e não tecidos e $1 \leq C_u \leq 5$, tecidos e não tecidos finos ($t \leq 2\text{mm}$) e $5 < C_u < 10$, não tecidos espessos ($t > 2\text{mm}$) e $5 < C_u < 10$,	Murray & McGown (1992), apud Corbet (1993)

Nota:
 $O_{50, 90 \text{ e } 95}$ = Aberturas de filtração do geotêxtil
 $D_{50, 90 \text{ e } 95}$ = Diâmetros característicos do solo

Em tubos geotêxtil, Lawson (2008) indica que o critério de retenção e o critério de permeabilidade são influenciados pelo fluxo e regime hidráulico (intermitente ou contínuo), propondo os critérios indicados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Critérios para dimensionamento hidráulico de tubos geotêxteis (adaptado de Lawson, 2008)

Critérios		Aplicação
AOS ≤ 0,5 mm	$q_{n,100} \geq 10 \text{ L/m.s}$	Fluxo lento e com regime hidráulico intermitente ou contínuo
AOS ≤ D ₈₅ (retido)	$q_{n,100} \geq 10 \text{ L/m.s}$	Fluxo < 1,5 m/s e regime hidráulico intermitente ou contínuo
AOS ≤ D ₈₅ (retido)	$q_{n,100} \geq 30 \text{ L/m.s}$	Fluxo ≥ 1,5 m/s e regime hidráulico intermitente
AOS ≤ D ₅₀ (retido)	$q_{n,100} \geq 30 \text{ L/m.s}$	Fluxo ≥ 1,5 m/s e regime hidráulico contínuo

Nota:
AOS = Aberturas de filtração do geotêxtil
D_{50 e 85} = Diâmetros característicos do solo
 $q_{n,100}$ = Capacidade de fluxo no plano para carga hidráulica de 100 mm (ABNT ISO 12959/2013)

3.2.3.3. Critério Anti-entupimento

As partículas de solo que se deslocam devido ao fluxo d'água podem interagir com o geotêxtil provocando entupimento por cegamento (*blinding*), bloqueamento (*blocking*) ou colmatção física (*clogging*). O cegamento ocorre quando uma pequena parcela do solo fino cria uma camada, comumente chamada de torta (*cake*), sobre as aberturas superficiais da manta. O bloqueamento é o fechamento dos vazios superficiais por partículas de solo retidas. A colmatção física ocorre quando as partículas de solo ficam impregnadas nos canais de poros dentro do geotêxtil. Existe ainda a colmatção biológica causada devido a colonização microbiana com formação de biofilme e também pela atividade de ferrobactérias com precipitação de compostos ferrosos.

Para evitar o entupimento do geotêxtil é importante que as partículas mais finas fiquem oclusas em uma matriz formada por partículas de maiores dimensões, assegurando a estabilidade interna do solo e formação de arcos no contato do solo com o geotêxtil para atingir condições ideais de filtração.

Neste modelo, o coeficiente de uniformidade (Cu) do solo é um parâmetro importante para se definir o melhor critério anti-entupimento, pois para $Cu \leq 3$ o geotêxtil costuma reter todo o solo, enquanto para $Cu > 3$ o geotêxtil geralmente permite a passagem de partículas finas. Os critérios propostos na literatura são apresentados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Critérios anti-entupimento do geotêxtil (adaptado de Christopher & Fischer, 1992)

Critério	Aplicação	Autores
Geotêxtil com o maior valor de O_{95}	$Cu \leq 3$	Christopher & Holtz (1985)
$O_{95}/D_{15} > 3$		Christopher & Holtz (1985)
$O_f/D_{15} > 4$	$Cu > 3$	French Committee of Geotextile (1986)
$O_{15}/D_{15} > 0,8$ a 1,2		Fischer et al. (1990)
$O_{50}/D_{50} > 0,2$ a 1,0		

Nota:
 $O_{f, 15, 50}$ e O_{95} = Aberturas de filtração do geotêxtil
 D_{15} e D_{50} = Diâmetros característicos do solo
 Cu = Coeficiente de uniformidade do solo

3.2.3.4. Critério de Durabilidade

O critério de durabilidade exige que o filtro seja resistente e durável para sobreviver ao processo de instalação e às condições operacionais durante a vida útil da obra.

Fabricantes de tubos geotêxteis garantem que os tecidos e as costuras que os compõem são inertes a degradação biológica e resistente a ataques químicos, álcalis e ácidos. Acrescentam que possuem uma duração mínima de 7 anos para funcionamento contra desgastes naturais de suas fibras quando expostos a raios UV e quando protegidos sua durabilidade atinge mais de 100 anos (TENCATE, 2007a).

3.2.4. Solicitações mecânicas do sistema em Tubo Geotêxtil

Pilarczyk (2000) relata que os esforços atuantes em tubos geotêxteis começam a aumentar durante o enchimento, alcançando valor máximo quando totalmente preenchido. Ao longo do desaguamento, as pressões internas se reduzem até a condição de solicitação imposta pelo peso próprio do material desaguado.

Para determinar os esforços mecânicos do sistema é importante verificar os critérios referentes à análise da forma e análise da tração requerida para operação.

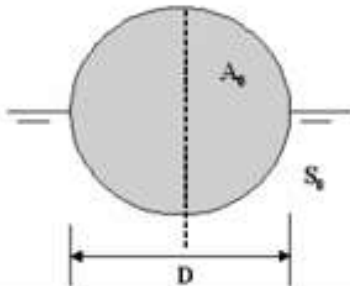
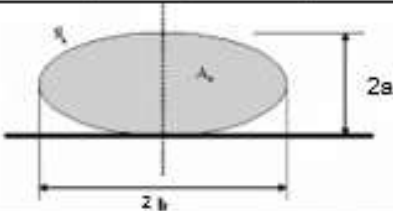
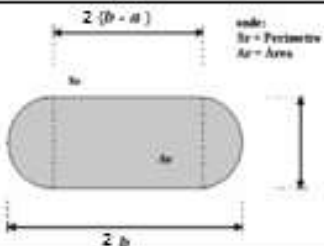
3.2.4.1. Análise da Forma

O formato que a seção transversal assume durante seu enchimento é consequência dos esforços atuantes no tubo geotêxtil, tais como a vazão e pressão do preenchimento e o peso do material.

Os sistemas fechados com tubo geotêxtil frequentemente apresentam as formas elípticas e falsas elípticas. A forma circular, dificilmente alcançada, é considerada para tubo com enchimento máximo ($\phi=1$, definido a seguir) e em caso de contêineres geotêxtil pode-se prever ainda o formato retangular.

A Tabela 3.8 apresenta os principais formatos da seção transversal de tubo geotêxtil com suas determinações de perímetro (S) e área (A).

Tabela 3.8 - Principais formatos da seção transversal de tubos geotêxteis (adaptado de Pilarczyk, 2000)

Formas	Dimensões	Equações [perímetro (S) e área (A)]
Circular		$S = \pi D$ $A_c = \frac{\pi D^2}{4}$
Elíptica		$S_e = 2\pi \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2}}$ $A_e = \frac{\pi ab}{4}$
Falsa elíptica		$S_{fe} = 2(b - a) + \pi a$ $A_{fe} = (b - a)a + \pi \frac{a^2}{4}$

Obs: O dobro da dimensão "a" será considerada adiante como a altura final do sistema "H"

Para dimensionamento e análise da forma, observa-se que:

- A razão de preenchimento (φ) é função da área transversal assumida (A_e ou A_{fe}) e a área totalmente preenchida, que considera-se a forma circular (A_o) (Equação 3.2)

$$\varphi = \frac{A_e}{A_o} \quad 3.2$$

- O perímetro da seção transversal (S) no formato totalmente preenchido (forma circular) é o mesmo no formato assumido (elíptico ou falsa elíptica).

Assim, para os casos de formato final elíptico, falso elíptico ou retangular (containers) tem-se a razão de preenchimento (φ) e a altura final do sistema (H) estabelecidos por Pilarczyk (2000), conforme apresentado na Tabela 3.9, que considera a altura do formato geométrico (a) como a altura final (H) do tubo geotêxtil preenchido.

Tabela 3.9 - Razão de preenchimento e Altura final do sistema (adaptado de Pilarczyk, 2000)

Formato final	Razão de preenchimento (φ)	Altura do sistema (H)
Elíptico	$\varphi = \frac{a b}{D^2}$	$H = \pm \frac{S}{\pi} \sqrt{1 \pm \sqrt{1 - \varphi^2}}$
Falso elíptico	$\varphi = \frac{4ab - 4a^2 + \pi a^2}{\pi D^2}$	$H = \frac{S}{\pi} (1 \pm \sqrt{1 - \varphi})$
retangular	$\varphi = \frac{4ab}{\pi D}$	$H = 0,25S_v \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4\varphi}{\pi}} \right)$

Embora trabalhada as questões relativas à etapa de enchimento e drenagem primária, Leshchinsky, Ling, e Gilbert (1996) relembram que a forma final do tubo também é influenciada pelo processo de adensamento do material e propõem aplicação da equação 3.3 para determinação da variação de altura (Δh).

$$\Delta h = H \cdot G_s \frac{(w_0 - w_f)}{1 + w_0 G_s} \quad 3.3$$

Onde:

G_s = Densidade real dos sólidos

w_0 = Teor de umidade inicial do material bombeado

w_f = Teor de umidade final do material bombeado

H = Altura do sistema no enchimento

3.2.4.2. Análise da resistência a tração

No que se refere às tensões provocadas, ou seja, as solicitações de trações (T), Castro (2005) verificou as propostas desenvolvidas por Liu, Goh e Silvester (1990), Kazimierowicz (1994) e Leshchinsky (1996), descritas de forma sucinta a seguir:

- A proposta de Liu, Goh e Silvester (1990) desenvolvida através de ensaios em tubos preenchidos com água, estabeleceu relações matemáticas entre os parâmetros de pressões, trações e formato (dimensões), criando um ábaco que auxilia no dimensionamento dos tubos geotêxteis (Figura 3.4).

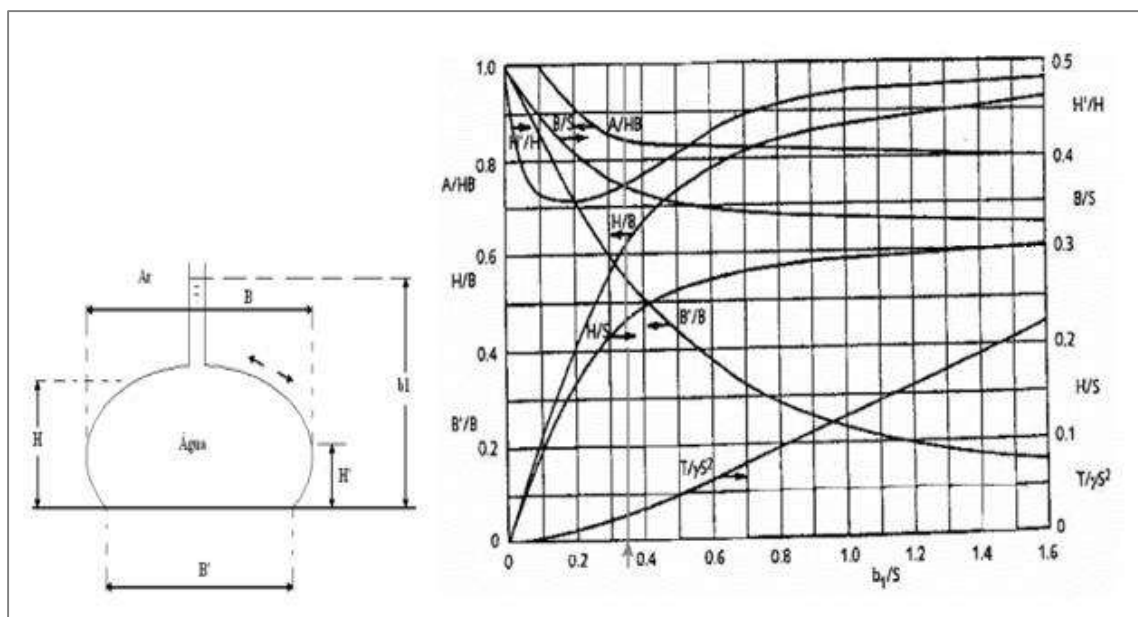


Figura 3.4 - Modelo e ábaco para dimensionamento de tubo geotêxtil (Liu, Goh e Silvester, 1990)

- A proposta de Kazimierowicz (1994) considerou o estado plano de deformação sobre a membrana e calculou as tensões no geotêxtil em três casos, apontando-os com base no valor da pressão interna no topo do tubo (P_0). Destaque para o caso em que $P_0 \neq 0$, pois melhor representa a pressão gerada para enchimento e a existente devido ao peso específico do material (Figura 3.5).

$p_0 \gg \gamma.H$	$p_0 \neq 0$	$p_0 = 0$
$T = 0,5.p_0.H$	$T = 0,25.\gamma.H^2 + 0,5.p_0.H$	$T = 0,25.\gamma.H^2$

Figura 3.5 - Modelo Kazimierowicz de verificação da tração no sistema (Kazimierowicz, 1994)

- A proposta de Leshchinsky (1996) trabalhou com o equilíbrio das tensões no contorno das seção transversal do tubo. Estabelecidas suas hipóteses, definiu a pressão hidrostática da lama em qualquer profundidade “x” ($P(x)$) e a relacionou com o raio de curvatura do tubo (r) e com a tração do geotêxtil (T) (Figura 3.6).

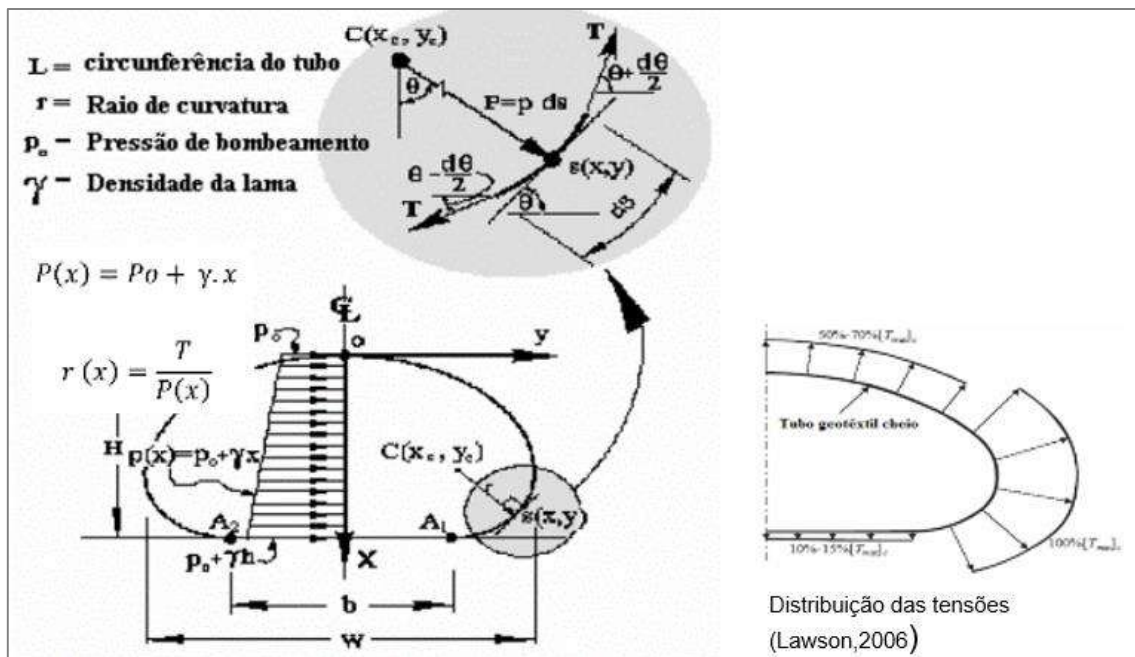


Figura 3.6 – Modelo Leshchinsky para tração do sistema e detalhes de tensões (Leshchinsky, 1996)

Devido à complexibilidade matemática no cálculo de todos os fatores que interferem ao dimensionamento de tubo geotêxtil, Yee (2016) indica que programas computacionais como o GeoCoPS (*Geosynthetic Confined Pressurized Slurry*) desenvolvido por Leshchinsky (1995) e o SOFTWIN (*Simulation of Fluid Filled Tubes for Windows*) criado pelo Palmerton (1998) têm sido utilizados no mercado para determinar as tensões e a geometria do tubo.

3.2.4.3. Solicitações mecânicas com sobreposição de tubos geotêxteis

Martins e Vidal (2006) relatam duas hipóteses de empilhamento dos tubos geotêxteis, ou seja: tubos geotêxteis sobrepostos na mesma direção e tubos geotêxteis sobrepostos na direção contrária. Ambas foram analisadas com base na metodologia de Kazimierowicz (1994), em que $p_0 \neq 0$ e desprezando o atrito entre os tubos.

A hipótese em que os tubos são assentados na mesma direção terá as pressões internas no tubo (P_s) e a tração requerida da manta (T), conforme se visualiza na Figura 3.7.

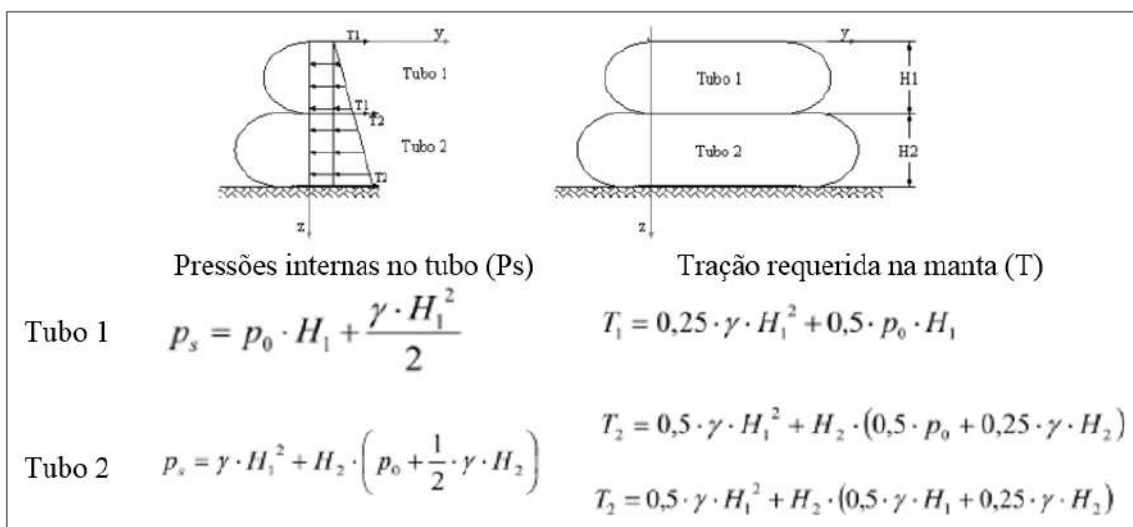


Figura 3.7 - Dimensionamento de tubos geotêxteis sobrepostos na mesma direção (adaptado de Martins e Vidal, 2006)

Na hipótese do assentamento na direção contrária, faz-se necessária a determinação de uma área de influência onde estará atuando a sobrecarga (q) imposta pelos tubos longitudinais. Em seguida é possível determinar a Tração requerida no tubo geotêxtil inferior (T) com base nesta sobrecarga (Figura 3.8).

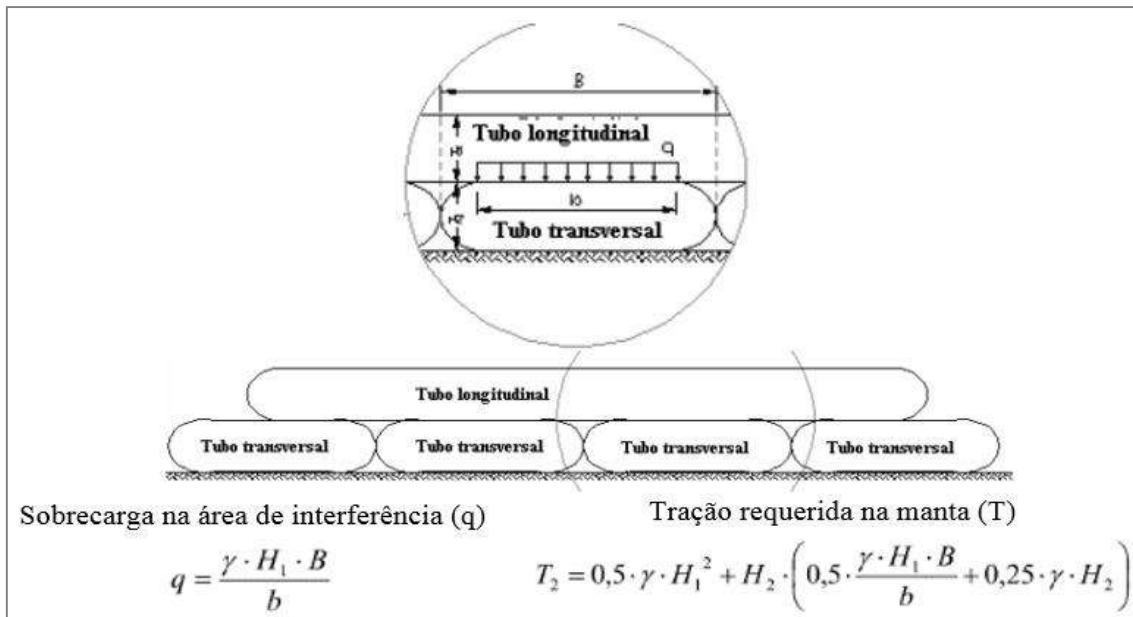


Figura 3.8 - Dimensionamento de tubos geotêxteis sobrepostos na direção contrária (adaptado de Martins e Vidal, 2006)

3.3. PROCESSO DE DISPOSIÇÃO CONFINADA EM TUBO GEOTÊXTIL

O acondicionamento de sedimento dragado em tubo geotêxtil pode ser considerado, ao mesmo tempo, uma forma de disposição, tratamento e, em alguns casos, como uso benéfico. O tratamento ocorre devido ao processo de desaguamento (drenagem, adensamento e evaporação) e possível contenção de elementos poluentes (Lim et al., 2011). O uso benéfico do sedimento dragado pode ser considerado quando sua estrutura cheia é utilizada como elemento em obras de engenharia, ou até mesmo na possibilidade de se fazer uso do sedimento retido, seja para material de construção, pavimentação ou agrícola.

3.3.1. Instalações do Sistema Geotêxtil Fechado (SGF)

O procedimento de instalação de um sistema geotêxtil fechado em formato de tubo vai depender de características do local de assentamento do sistema, do material a ser retido, do procedimento de enchimento do tubo, e do objetivo final deste processo.

No caso de instalações de tubo geotêxtil em terra, cujo preenchimento ocorre com bombeamento de lama composta por sedimentos finos de dragagem é importante efetuar: preparação da área de recebimento, posicionamento e fixação do tubo a ser enchido, condicionamento da lama com polímeros, instalações da estrutura de bombeamento para

enchimento, instalações dos dispositivos de controle e destinação do efluente, além dos critérios de encerramento.

3.3.1.1. Preparação da área e posicionamento do tubo geotêxtil

O local de recebimento dos tubos geotêxteis deve ter espaço suficiente, uma boa capacidade de suporte, ser nivelada e livre de protuberâncias. Smith (2017) acrescenta que a área deve ter inclinação de 1 a 2 % paralelo ao comprimento do tubo geotêxtil para facilitar o escoamento do líquido desaguado aos dispositivos de drenagem (canaletas e poço) que auxiliam na condução desse efluente para o descarte ou tratamento, quando necessário. O guia técnico de projetos com geossintéticos da empresa Allonda indica que a terraplanagem é o primeiro passo para preparação da célula de assentamento e recomenda uma declividade de 0,5% no sentido longitudinal da unidade.

Essa área de recebimento deve ter base impermeável e bermas de proteção para evitar que o líquido desaguado infiltre no solo ou transborde para áreas adjacentes. Nesta impermeabilização é comum o uso de solo compactado e/ou geomembrana (PEAD espessura $\geq 1,0$ mm). Para proteger o sistema de impermeabilização do trânsito de máquinas, equipamentos e pessoas é recomendado o uso de manta geotêxtil não tecido de no mínimo 5 mm de espessura, sobre a qual utiliza-se material com maior permeabilidade que pode ser um camada drenante de brita (espessura ≥ 15 cm) ou geocomposto drenante que permite direcionar o líquido desaguado para setor de coleta e tratamento, visando o descarte adequado em corpo receptor (Figura 3.9).

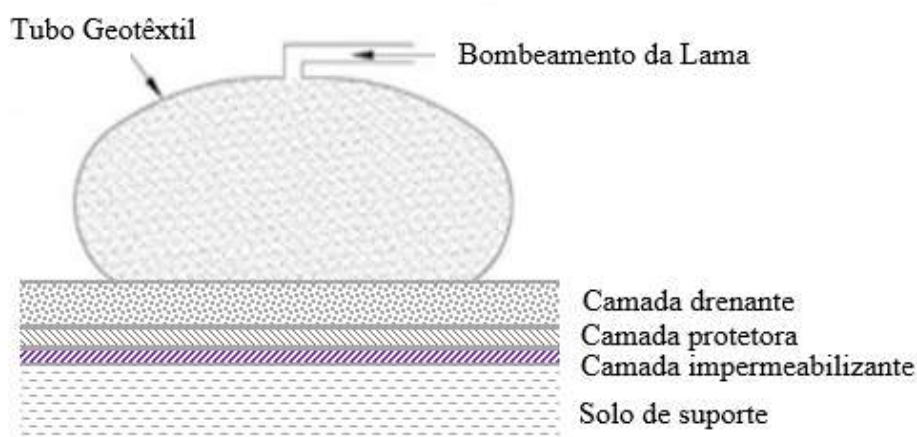


Figura 3.9 - Seção transversal do tubo sobre base de recebimento em terra (próprio autor)

Após a preparação da superfície, o tubo geotêxtil projetado é estendido com os dispositivos de entrada (mangas) voltados para cima e fixado ao chão pelas alças de manipulação garantindo a posição durante o enchimento.

Em instalações marinhas e subaquáticas é utilizada uma tela ante-erosão (geotêxtil tecido), fixada por prendedores na base do tubo geotêxtil, conhecido como tapete de ancoragem que preserva a base da estrutura contra a erosão causada pelas ondas e correntes que normalmente ocorrem em ambiente marinhos e fluviais (Ortiz; Junior; Ladchumananandasivam, 2003).

Outra forma de instalação para o tubo geotêxtil pode ser o sistema móvel, cuja estrutura é montada dentro de uma carreta (TENCATE, 2007a).

3.3.1.2. Condicionamento da lama com polímero

Para melhor desempenho na retenção da parte sólida da lama dentro do tubo geotêxtil é importante a adição de polímeros, cuja ação promove coagulação e floculação de partículas finas prevenindo o bloqueio dos poros, a colmatação, fuga de finos e possível adsorção de poluentes nos flocos produzidos (Vertematti, 2015).

A planta de polimerização deve conter reservatórios para a preparação da solução com polímero, geralmente solubilizado em água. É importante a existência do reservatório de polímero (geralmente em pó), do reservatório da água de diluição, e o reservatório de preparação da solução polimérica.

Os polímeros sintéticos baseados em poliacrilamida catiônica (CPAM) são rotineiramente utilizados nas atividades de desaguamento de sedimentos em tubos geotêxteis, embora alternativas mais sustentáveis a base de amidos catiônicos estejam em crescente processo de estudo para obter a mesma eficiência de desaguamento e manter flocos com alta estabilidade ao cisalhamento (Shirzad-Semzar et al., 2007; Khachan et al., 2014).

As instalações de condicionamento da lama necessitam ainda de dosadores e agitadores mecânico ou hidráulico (chicanas) para se obter uma mistura ideal da solução polimérica com a lama de dragagem, conforme desempenho previamente definido em laboratório.

Na prática, após a dosagem da solução polimérica na tubulação que conduz a lama ao tubo geotêxtil, é instalada uma chicana misturadora constituída de tubulação com curvas em *zig zag* horizontal capaz de promover turbulência para mistura e floculação, sistema também chamado de floculação em linha. Um registro para coleta de amostra é instalado a jusante da chicana para verificação da qualidade do floco. Caso se constate uma floculação inadequada durante o monitoramento, uma tubulação de retorno deve conduzir a mistura para que novo processo seja realizado com a dosagem ajustada. Um esquema deste processo de condicionamento da lama por agitador hidráulico tubular é observado na Figura 3.10.

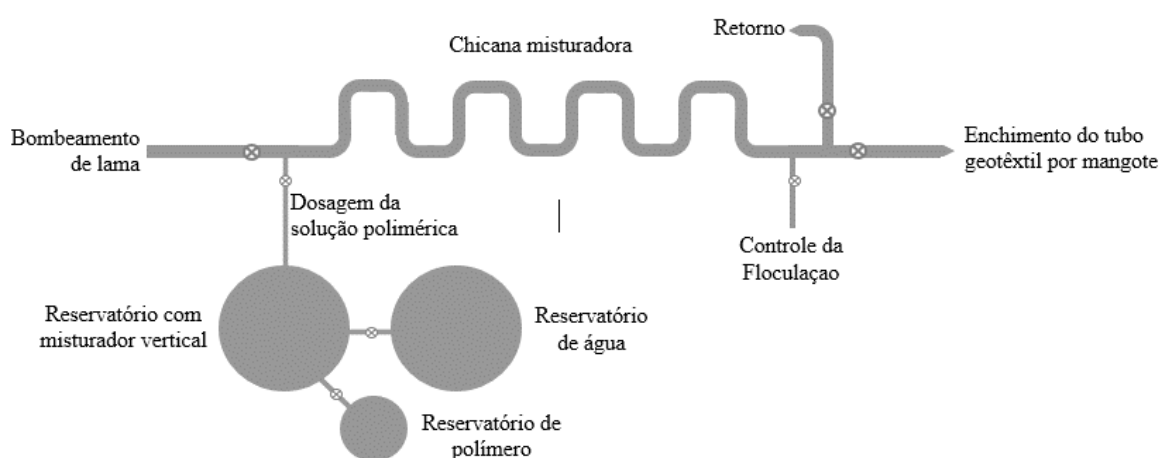


Figura 3.10 - Esquema de condicionamento da lama com mistura hidráulica para floculação em linha (próprio autor)

A capacidade volumétrica dos reservatórios de polímero, água e solução, bem como o dimensionamento da unidade de mistura (solução polimérica e lama dragada) vão depender da concentração e dosagem do polímero, do gradiente de velocidade e tempo de agito, determinados em ensaios de laboratório. O dimensionamento depende ainda da vazão e diâmetro da tubulação de enchimento do tubo geotêxtil.

3.3.1.3. Estrutura e forma de enchimento

O enchimento do tubo geotêxtil com material dragado pode ser efetuado de forma mecânica através de um funil ligado diretamente a boca de entrada do tubo, denominado de bocal com manga costuradas na parte superior do tubo¹⁶. Esse procedimento se realiza

¹⁶ Os bocais e as mangas possuem tipicamente um diâmetro de 30 a 45 cm e comprimento de 0,9 a 1 metro, respetivamente (GSI, 2012).

pendurando o funil a uma determinada distância sobre a altura final prevista para o tubo. Assim, pode-se controlar manualmente a altura de queda da lama necessária para alcançar a pressão de enchimento que permitirá atingir a altura final de projeto sem criar esforços excessivos no geotêxtil.

O outro método de enchimento é hidráulico, mediante o bombeamento através de mangueiras flexíveis ligadas diretamente ao dispositivo de entrada do tubo. A utilização deste método em processo de dragagem, geralmente requer a instalação de tubulações de recalque para transporte da lama e de *manifold* para controle da pressão e distribuição do fluxo para enchimento em diversos pontos dos tubos geotêxteis (Yee et al, 2012).

Howard (2011) esclarece que se o material de enchimento for areia, as portas de entrada do tubo geotêxtil devem ser afastadas no máximo em 10 metros para permitir enchimento uniforme do tubo, se o material de enchimento for uma lama com material argílico o distanciamento entre as portas podem ser maior, até 30 m (GSI, 2012), pois o fluido permite maior distribuição.

Em geral, para introduzir a lama ao interior do tubo geotêxtil faz-se uso da pressão de bombeamento. Essa pressão proporciona um alcance de altura máxima do tubo e é limitada pela resistência a tração do tubo (geotêxtil e costura).

Com relação a esse critério de resistência, Leshchinsky et al. (1996) apud Howard (2011) recomendam que essa tensão de trabalho deve ser 3,9 vezes menor que a resistência máxima à tração do geotêxtil. Ortiz et al. (2003) lembram que as costuras bem feitas suportam de 50% a 80% da resistência do geotêxtil na prova de resistência à tração da faixa larga, portanto são os pontos de maiores fragilidades. As tensões axiais geradas em tubos geotêxteis são aproximadamente 60% das tensões circunferenciais máximas do tubo geotêxtil e essas tensões aumentam significativamente quando a altura do tubo é maior que 0,4 vezes o diâmetro máximo (Smith, 2017).

A pressão de bombeamento aumenta significativamente a tensão no tubo e acima de determinado nível de pressão não há necessariamente um aumento representativo da capacidade de armazenamento e sim um risco de rompimento (HOWARD, 2011).

Na prática, a pressão de enchimento na boca de entrada está entre 0,5 a 1 metro de coluna d'água (mca) (BEZUIJEN; VASTENBURG, 2013). Howard (2011) adverte

que uma linha de dragagem pode atingir facilmente cerca de 300 kPa (30 mca) o que gera problemas para o sistema geotêxtil. Como medida de prevenção recomenda-se instalação de *manifold* e manômetro para controlar a pressão do fluxo de enchimento no tubo, a qual não deve ser superior a 5 psi, equivalente a 34,5 kPa (3,5 mca) (Smith, 2017).

A medida comumente adotada para evitar sobrecarga e ruptura catastrófica devido à pressão de enchimento e tensão do tubo é o controle da altura de enchimento do tubo em relação ao seu diâmetro teórico (Yee & Lawson, 2012).

Durante a etapa de enchimento dos tubos geotêxtil, Monteiro (2010) ao relatar o processo pioneiro das obras de dragagem do Canal do Fundão no Rio de Janeiro, observa que para evitar problemas de rolamento do tubo realizou-se o engordamento da camada drenante de brita e para amenizar o efeito da colmatação do geotêxtil, os tubos receberam constante escovamento e lavagem sob pressão, com água reaproveitada do desaguamento, para retirada das partículas.

A etapa de enchimento pode ser única, no entanto o enchimento cíclico proporciona maior aproveitamento do volume útil dos tubos. Essa forma de enchimento dependerá de fatores como: vazão de sólidos de entrada, características de permeabilidade do sistema (solo/geotêxtil) e coeficiente de consolidação do material para futura secagem.

Lawson (2006) apresenta um esquema indicando a variação do volume do tubo geotêxtil ao longo do tempo, com ênfase na variação inicial e enfatizando a necessidade de enchimento cíclico para maior retenção de sólidos (Figura 3.11).

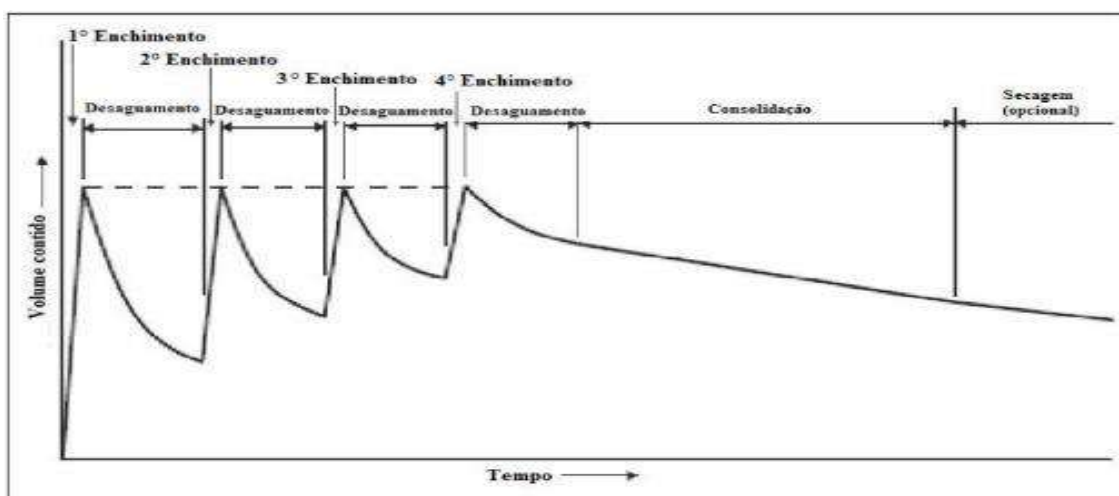


Figura 3.11 - Enchimento cíclico e a variação de volume ao longo do tempo (Lawson, 2006).

O ciclo de enchimento foi relatado por Monteiro & Marques (2014) que indicou o tempo médio estimado em 7 dias para que o tubo do Canal do Fundão atingisse a altura de controle (aprox.. 2,4 m) pela primeira vez. Após esse período, outro tubo era enchido enquanto esse desaguava por 7 dias até novo enchimento.

3.3.1.4. Dispositivos de coleta e destinação do efluente

No geral, os tubos geotêxteis retêm os sedimentos e promovem um efetivo desaguamento, reduzindo o volume e aumentando a porcentagem de matéria sólida. Com relação ao efluente gerado, Pilarczyk, Breteler & Stoutjesdijk (1998) relatam que, com base no monitoramento da qualidade, esses podem ser retornados ao meio ambiente, reaproveitados ou encaminhados ao tratamento.

Os dispositivos de drenagem normalmente utilizados para remoção do líquido desaguado são as canaletas da área de assentamento do tubo e as caixas de retenção para bombeamento ao local de destinação. Quando houver necessidade de tratamento, o método e a estrutura dependerão das características do efluente e dos padrões de lançamento no corpo receptor.

3.3.1.5. Critérios de encerramento

Uma vez que os tubos geotêxteis foram preenchidos conforme altura estabelecida em projeto e que se objetiva a contenção em caráter definitivo, é recomendável cobri-los, com solo, plantas, concreto, ou outra forma de proteção para prevenir o vandalismo e degradação devido a longa exposição aos raios de sol (Ortiz et al., 2003). Caso se pretenda utilizar ou dar uma destinação ao material retido, o tubo geotêxtil pode ser aberto para retirada deste material desaguado e a área pode ser desativada.

Embora se tenha escrito com ênfase para instalação e operação de sistema fechado geotêxtil no formato de tubular com disposição terrestre, há de se observar as demais formas de disposição prevista na Figura 3.12.



Figura 3.12 - Formas de disposição do sistema fechado geotêxtil com sedimento dragado.

3.3.2. Ensaios de verificação preliminar de Sistema Geotêxtil Fechado

Para compreender previamente o comportamento de um sistema fechado de geotêxtil ao ser preenchido com um determinado material, alguns ensaios podem ser realizados. Em especial, encontram-se o ensaio de cone ou mini-funil, o ensaio de bolsa suspensa, o ensaio de bolsa de pequena dimensão e o teste de filtragem com pressão.

3.3.2.1. Teste de desagüamento rápido e ensaio de mini funil

O procedimento para execução deste ensaio tem sido discutido e utilizado por diversos autores, como Martins (2006), Lawson (2008), Castro et al. (2009), Tominaga (2010) e Torres et al (2011). Embora não se tenha conhecimento de uma normatização por parte de organismos credenciados, alguns protocolos têm sido desenvolvidos pelas empresas especializada em geossintéticos.

De acordo com o protocolo descrito pela empresa TenCate (2007), o procedimento denominado RDT teste (*Rapid Dewatering Test*) é um teste simples e rápido para se determinar a eficiência do desagüamento de uma amostra através da trama do geotêxtil. Esse teste contribui para avaliar a eficiência do polímero selecionado, com base no tempo de filtração, volume e qualidade do percolado filtrado. Permite ainda uma previsão do percentual de umidade da torta após o desagüamento.

O RDT possui um kit de execução e oito passos que abordam desde a preparação da solução de polímero e suas dosagens até o lançamento lentamente da lama floculada no funil, propondo o registro do volume de percolado, tempo de desagüamento, turbidez, percentual de sólidos do percolado e teor de sólidos do lodo desagüado (TenCate, 2007).

Com procedimento similar, o ensaio de mini funil utilizado pela empresa Huesker requer equipamentos simples que consistem em: a) amostra circular do geotêxtil que formará o funil (cone), b) suporte para o cone formado, c) recipiente para coleta do efluente e d) cronômetro. A Figura 3.13 ilustra o kit desenvolvido e os demais equipamentos utilizados para a realização desses procedimentos.

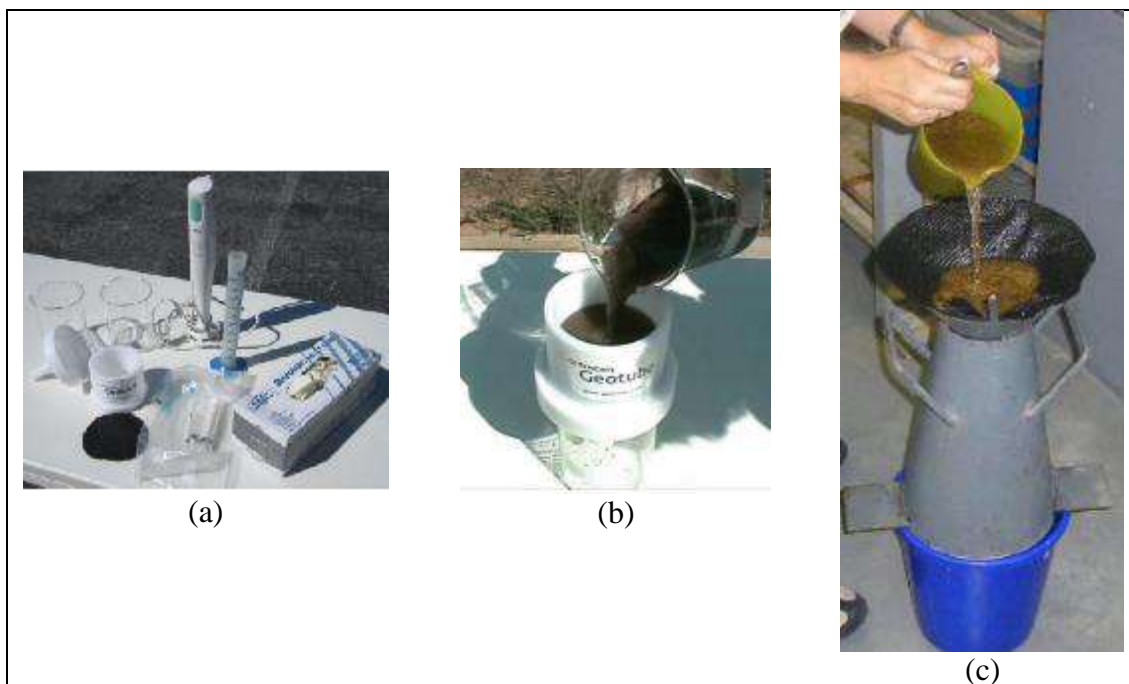


Figura 3.13 - Registros fotográficos de Teste de desaguamento rápido (RDT) e ensaios de mini funil: a) equipamento do ensaio RDT; b) enchimento de lama no RDT; c) enchimento de lama no mini funil (adaptado de TenCate, 2007 e Tominaga, 2010).

3.3.2.2. Ensaio de bolsa suspensa

O ensaio de bolsa suspensa (*Hanging Bag test*), proposto inicialmente por Fowler & Stephens (1993) para a ASTM, foi normatizado em 2011. O GRI (*Geosynthetic Research Institute*) também possui procedimentos para realização de ensaios com bolsa suspensa, conforme se visualiza na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 - Normativas de ensaios de bolsa suspensa

Norma	Descrição
ASTM D7701: 2011	Standard Test Method for Determining the Flow Rate of Water and Suspended Solids from a Geotextile Bag
GRI – GT-14	The Hanging Bag Test for Field Assessment of Fabrics Used for Geotextile Bags, Containers and Tubes

Este ensaio consiste em medir, em um intervalo de tempo, a quantidade de sedimentos que passam através de uma bolsa suspensa de geotêxtil. A análise do material

passante permite determinar a quantidade de sólidos suspensos e a razão de fluxo desse material (Martins, 2006).

Devido às dimensões da estrutura utilizada, é considerado um ensaio intermediário entre laboratório e protótipo de campo. Sua aplicação próxima ao local de acesso do material de enchimento viabiliza a utilização.

Martins (2006) descreve que o equipamento utilizado no ensaio é composto por uma bolsa de geotêxtil costurada dos lados e na base e com capacidade aproximada de 175 litros. A bolsa, que possui abertura no topo, é pendurada em uma estrutura capaz de suportar todo o conjunto mais o material de enchimento. São utilizadas bacias para conter o material desaguado pela bolsa, galões de abastecimento, cronômetro e balança (Figura 3.14).

O procedimento de execução do ensaio consiste basicamente em verter o material no interior da bolsa de geotêxtil e coletar amostras do material percolado em intervalos de tempo. Porcentagens de sólidos do percolado coletado são determinadas, juntamente com a análise das umidades do material retido na bolsa, com a finalidade de estimar a eficiência ao desaguamento e filtração do sistema.



Figura 3.14 - Registros fotográficos de ensaios de bolsa suspensa: a) aparato de suporte, b) condicionamento da lama, c) enchimento da bolsa suspensa, d) abertura da bolsa suspensa (adaptado de Martins, 2006 e Mastin, Leebster e Salley, 2008).

3.3.2.3. Ensaio de bolsa de pequenas dimensões (mini-geoforma)

O ensaio com bolsa fechada de pequenas dimensões foi desenvolvido em 2009 pelo Instituto de pesquisa em geossintético (*Geosynthetic Research Institute - GRI*) que denominou o ensaio de *pillow test* devido ao formato de travesseiro dessa mini-geoforma.

A associação americana de normas técnicas (*American Society for Testing and Materials* – ASTM) propôs em 2013 um método para determinar a taxa de fluxo do desaguamento e a retenção de sólidos suspenso em um sistema fechado com características similares. A empresa TenCate também desenvolveu uma metodologia denominada GDT (*Geotube Dewatering Technology*) com sistema na mesma linha de procedimento da ASTM. A Tabela 3.11 apresenta a identificação desses 03 (três) documentos normativos.

Tabela 3.11 - Normativas e protocolo para ensaio com mini - geoforma

Norma/ protocolo	Descrição
ASTM D7880: 2013	Standard Test Method for Determining Flow Rate of Water and Suspended Solids Retention from a Closed Geosynthetic Bag
GRI – GT-15: 2009	The Pillow Test For Field Assessment of Fabrics/Additives for Geotextile Bags, Containers and Tubes
TenCate	TenCate Geotube GDT test – A Demonstration of Geotube Dewatering Technology

Os procedimentos dos ensaios, embora similares, apresentam características diferentes, a começar pelas dimensões da mini-geoforma e capacidade de enchimento, conforme se observa na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 - Dimensões previstas para os testes de mini-geoforma

Instituição	Dimensões prevista para a mini-geoforma
GRI	- Comprimento de 50 a 65 cm e largura de 38 a 65 cm - Capacidade de 20 a 30 litros
ASTM	- Comprimento aproximado de 53 cm e largura aproximada de 53 cm - Capacidade de 28,32 litros (1ft ³) Amostra de lama de 55 a 95 L
TenCate	- Dimensões não indicadas, - Capacidade não indicada, apenas informa amostra de enchimento de 57 a 95 litros e quanto maior o teor de sólidos maior deve ser a amostra.

Este ensaio determina a capacidade de desaguamento e retenção do sedimento, sendo uma alternativa ao ensaio de bolsa suspensa com a vantagem de poder medir a carga hidráulica no tempo e utilizar uma quantidade menor de material.

O Procedimento consiste em verter o material, preparado com dosagem de polímero já estabelecida, em um tubo conectado a mini-geoforma até que atinja o topo do nível do tubo (protocolo TenCate estabelece uma marca de 7 kPa). Em seguida a cada 10 cm de descida do material, no tubo de enchimento, marca-se o tempo, cessando o ensaio quando o nível de material estiver na base do tubo de entrada.

O ensaio permite coletar material retido e passante para verificar respectivamente o teor de sólidos e umidade e parâmetros de qualidade do efluente. Os materiais utilizados na execução do ensaio podem ser visualizados na Figura 3.15.



Figura 3.15 – Registros fotográficos de ensaios de bolsa de pequena dimensão: a) estrutura do ensaio, b) materiais utilizados, c) condicionamento da lama, d) enchimento manual, e) bolsa cheia, f) bolsa vazia, g) estrutura com tripé (adaptado de Yee et al., 2011; TenCate, 2010 e Tominaga, 2010)

3.3.2.4. Teste de filtração com pressão

O teste de filtração por pressão permite a verificação do desempenho de desaguamento de geotêxteis sob pressões previstas em tubos geotêxteis reais. Vários autores (Bhatia & Satyamurthy, 2009; Cantré & Saathoff, 2011; Maurer et al., 2012 e Khachan et al., 2014) relataram que o teste de filtração com pressão contribui com a seleção de geotêxteis apropriados para desaguamento de materiais de alto teor de água.

Esses autores informam que o aparato de ensaio (Figura 3.16) consiste de um suporte que contempla uma placa inferior, uma câmara de teste central e uma placa superior. A placa inferior recebe o geotêxtil a ser testado e direciona o fluxo de efluentes por dispositivo em formato em funil até um recipiente cilíndrico calibrado para medição. A câmara central de características acrílica e translúcida possui diâmetro interno de 7,2 cm e altura de 17 a 35 cm para receber a lama a ser desaguada. A placa superior possui uma entrada axial para facilitar a aplicação da pressão de ar na câmara central conforme condições reais de campo.

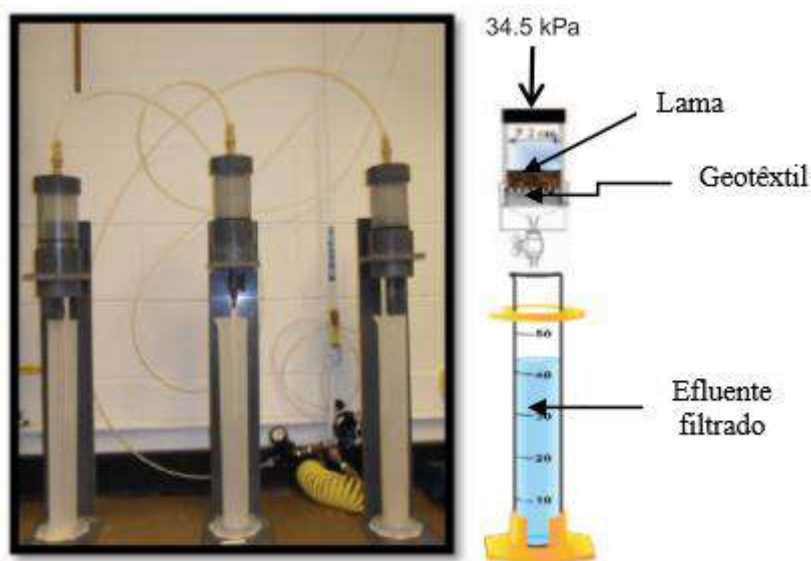


Figura 3.16 – Aparato do teste de filtração com pressão (adaptado de Khachan et al., 2014)

O teste de filtração com pressão é relativamente simples de usar e produz medições comparáveis a teste mais trabalhosos, que frequentemente apresentam baixa repetibilidade. O procedimento do teste prevê o registro temporal do volume filtrado, altura da torta retida no geotêxtil e aferição do teor de umidade.

3.3.3. Índices de avaliação de desempenho do processo

Com base nos levantamentos realizados por Guimarães & Urashima (2013), os indicadores utilizados para se avaliar o desempenho do processo são: Eficiência de Filtração (EF), Eficiência do Desaguamento (ED), Eficiência da Infiltração (EI), Sólidos Passantes (SP) e *Piping*¹⁷ ou Perda de Partículas (PP), cujas formas de cálculo e autores são indicados na Tabela 3.13.

Tabela 3.13 - Indicadores de avaliação do desempenho do processo com geotêxtil (elaborado a partir de Guimarães e Urashima, 2013)

Indicador	Equação	Autores
Eficiência de Filtração (EF)	$EF(\%) = \frac{ST_{inicial} - ST_{final}}{ST_{inicial}} \times 100$	Moo-Young e Trucker (2002) e Liao e Bhatia (2006)
Eficiência do Desaguamento (ED)	$ED(\%) = \frac{PS_{final} - PS_{inicial}}{PS_{inicial}} \times 100$	Moo-Young et al. (2002)
Eficiência da Infiltração (EI)	$EI(\%) = \frac{W_{inicial} - W_{final}}{W_{inicial}} \times 100$	Muthukumaran e Ilamparuthi (2006)
Sólidos Passantes (SP)	$SP(\%) = \frac{SST_{final}}{ST_{inicial}} \times 100$ ou $SP(\%) = \frac{ST_{final}}{ST_{inicial}} \times 100$	Bhatia (2009) Tominaga (2010)
Perda de Partículas (PP)	$PP(g / m^2) = \frac{SST_{final}}{A}$ ou $PP(g / m^2) = \frac{ST_{final}}{A}$	Satyamurty (2008) Tominaga (2010)

Onde:

$ST_{inicial}$ = Sólidos totais iniciais da lama (mg/l)

ST_{final} = Sólidos totais finais do efluente (mg/l)

$PS_{inicial}$ = Teor de sólidos em peso inicial(%)

PS_{final} = Teor de sólidos em peso final (%)

$W_{inicial}$ = Umidade inicial

W_{final} = Umidade final

SST_{final} = Sólidos suspensos final do efluente (g)

A = área efetiva do geotêxtil no desaguamento (m²)

Ao efetuarem testes de filtração a vácuo em tubo geotêxtil, Moo-Young & Tucker (2002) acrescentam indicadores de avaliação operacional do desaguamento, tais como a taxa de desaguamento, coeficiente de consolidação e resistência específica (Tabela 3.14).

¹⁷O fenômeno *piping* é provocado pelo aparecimento de surgências d'água que desencadeia a erosão interna do solo com a remoção de partículas do seu interior, formando "tubos" vazios que podem provocar colapsos e escorregamentos laterais do terreno.

Tabela 3.14 - Indicadores de avaliação operacional em tubo geotêxtil (elaborado a partir de Moo-Young & Tucker, 2002)

Indicador	Equação	Descrição
Taxa de desaguamento	$\frac{dV}{dt} = \frac{PA^2}{\mu(rcV + R_m A)}$	Indica a velocidade a que a água passa através de uma interface <i>filter cake</i> / geotêxtil. Pode ser expressa em termos de condutividade hidráulica do material de enchimento e a permeabilidade do geotêxtil.
Coefficiente de consolidação / adensamento	$c_v = \frac{T_v h^2}{t}$	Relaciona a compressibilidade e a permeabilidade do material
Resistência específica (ao desaguamento)	$r = \frac{2bPA^2}{\mu c}$	Determina o potencial de desaguamento de lammas finas. Uma alta resistência específica corresponde a elevada compressibilidade e menores taxas de filtração com o tempo.

Onde:

v = volume de filtração

t = tempo do ciclo

P = pressão

A = área de filtração

μ = viscosidade do filtrado

r = resistência específica

R_m = Resistência inicial do geotêxtil (usualmente descartada por ser considerada baixa com relação a resistência do filter cake)

c = peso de sólido por unidade de volume do filtrado

T_v = coeficiente adimensional de tempo correspondente a um determinado grau de consolidação

h = comprimento médio do percurso de drenagem da amostra

t = tempo de consolidação

b = inclinação da curva t/V por V

3.4. CONCLUSÕES PARCIAIS

As formas de destinação de sedimentos de dragagem em sistema geotêxtil fechado (SGF), bem como as propriedades do geotêxtil utilizado e do material de enchimento, auxiliam no dimensionamento do sistema a partir do cálculo das solicitações hidráulicas e mecânicas descritas nesse estudo.

O processo de instalação do SGF deve prever a preparação da área, a fixação do tubo geotêxtil, as estruturas de condicionamento da lama, os aparatos de enchimento e os dispositivos de tratamento dos percolados, conforme detalhamento realizado.

Ensaio de cone ou mini-funil, ensaio de bolsa de pequena dimensão, ensaio de bolsa suspensa e o teste de filtragem com pressão são indicados para verificação preliminar do desaguamento em SGF, conforme índices de avaliação do desempenho.

4. DESCRIÇÃO DO COMPLEXO LAGUNAR DE JACAREPAGUÁ.

Este capítulo apresenta uma descrição da região do complexo lagunar de Jacarepaguá, utilizada como estudo de caso devido a intensão de dragagem futura das lagoas e possível uso da tecnologia de sistema geotêxtil fechado para desaguoamento dos sedimento dragados.

4.1. LOCALIZAÇÃO E HIDROGRAFIA

O Sistema de Gerenciamento de Recursos Hídricos do estado do Rio de Janeiro é composto por nove bacias hidrográficas (Figura 4.1), dentre elas a Bacia Hidrográfica da Baía de Guanabara (RH-V), cujo comitê foi instituído por meio do Decreto Estadual n° 38.260/2005.

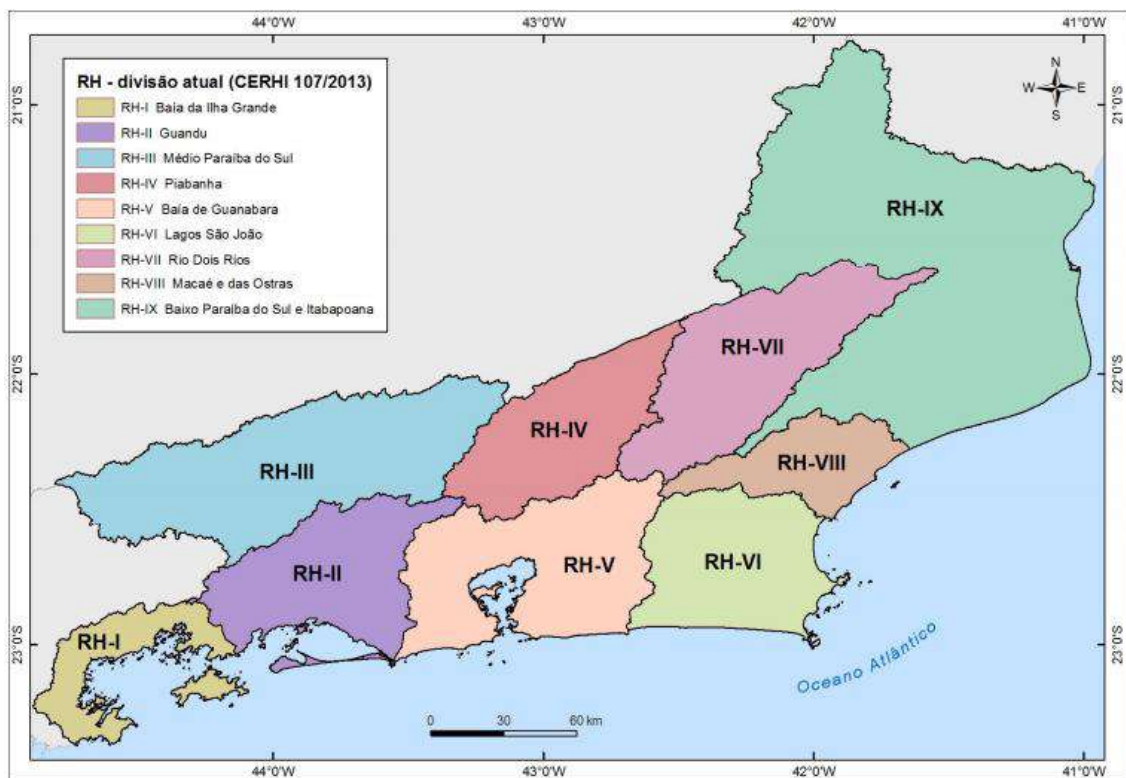


Figura 4.1 - Divisão das nove bacias hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro (Resolução CERHI-RJ n° 107/2013 – COPPETEC, 2014)

A Bacia hidrográfica da Baía de Guanabara, por sua vez, é dividida em dezessete sub-bacias, das quais seis possuem subcomitês, dentre eles o subcomitê de Jacarepaguá, criado em outubro de 2011 (Figura 4.2).

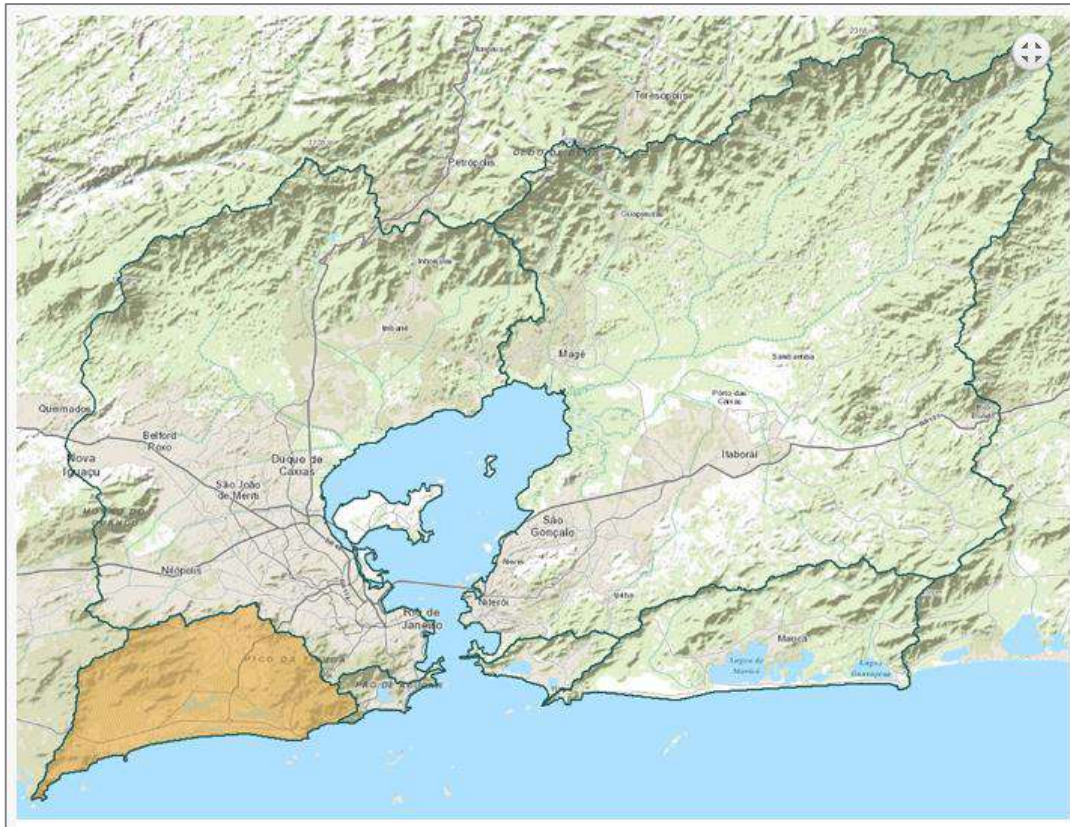


Figura 4.2 - Mapa com destaque da sub-bacia hidrográfica de Jacarepaguá na Bacia da Baía da Guanabara. (Comitê de bacia da Baía da Guanabara, 2016)

A sub-bacia hidrográfica de Jacarepaguá tem área aproximada de 280 km², cerca de 25% da cidade do Rio de Janeiro, e está localizada na planície litorânea da zona oeste da cidade, cujos limites são determinados pelas encostas atlânticas do maciço da Pedra Branca ao oeste, maciço da Tijuca ao leste, serra do Valqueire ao norte e o oceano atlântico ao sul (Amorim, 2015).

Compõem essa sub-bacia, 13 regiões hidrográficas, uma área especial de restinga e um sistema lagunar conhecido como Complexo Lagunar de Jacarepaguá – CLJ que compreende as lagoas denominadas como lagoas de Jacarepaguá¹⁸, Camorim¹⁹, Tijuca²⁰ e Marapendi²¹ (Figura 4.3).

¹⁸ Na língua Tupi, Jacarepaguá significa "lagoa rasa dos jacarés" (*yaka-ré-upá-guá*);

¹⁹ Na língua Tupi, Camorim significa "robalozinho" (*kamuri – im*);

²⁰ Na língua Tupi, Tijuca significa "água podre" (*ty – iuk*);

²¹ Na língua Tupi, Marapendi significa "rio de mar raso" (*pará - peb - y*).

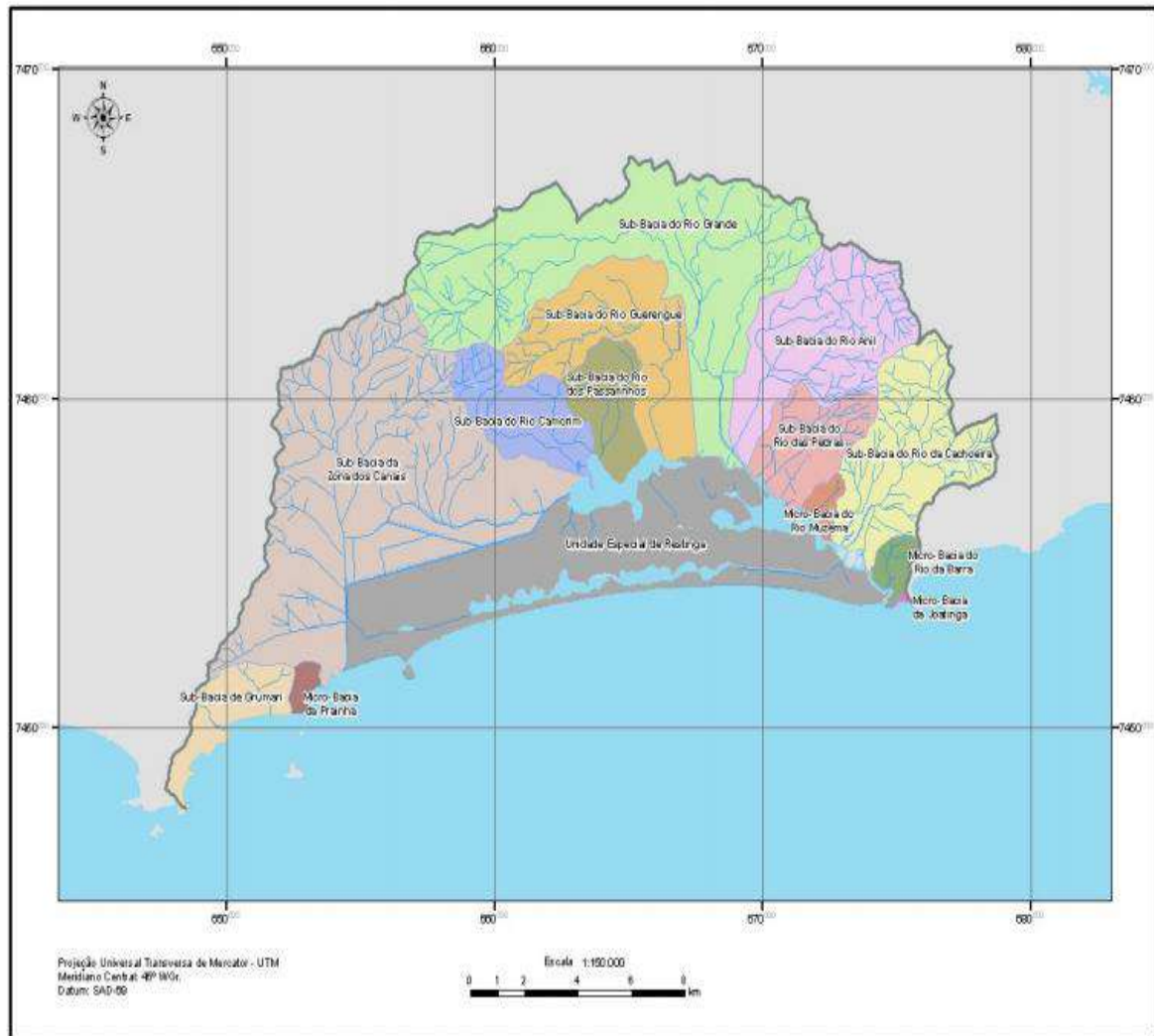


Figura 4.3 - Mapa das treze regiões hidrográficas da Sub-bacia de Jacarepaguá (FREITAS, 2009)

4.1.1. Características geométricas das lagoas

Dados de 1977 da Superintendência Estadual de Rios e Lagos (SERLA)²² indicam que essas lagoas juntas formam um espelho d'água de aproximadamente 12,8 km² (Figura 4.4) e apresentam dimensões médias de largura, comprimento, profundidade, perímetro e volume de água conforme Tabela 4.1. Ainda que os dados desta tabela estejam desatualizados, a principal mudança são as profundidades médias em decorrência de assoreamentos e dragagens ocorridos ao longo destes 30 anos.

²² A Superintendência Estadual de Rios e Lagoas (SERLA) criada em março de 1975 foi transformada em Fundação em junho/1990 e fundida com o Instituto Estadual de Florestas (IEF) e a Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente (FEEMA) para a formação do Instituto Estadual do Meio Ambiente (INEA) instalado em janeiro/2009.



Figura 4.4 - Mapa de Localização das lagoas do Complexo Lagunar de Jacarepaguá (MASTERPLAN, 2013)

Tabela 4.1 - Características geométricas das lagoas do Complexo lagunar de Jacarepaguá (elaborado a partir de Feema, 1991 e SERLA, 1977 apud Sampaio, 2008)

Lagoa	Espelho d'água (km ²)	Largura média (Km)	Comprimento médio (Km)	Perímetro médio (Km)	Profundidade média (m)	Volume médio (m ³)
Jacarepaguá	3,7	0,93	4,0	15,0	3,3	12.276.000
Camorim	0,8	0,49	3,5	8,0	1,3	2.229.500
Tijuca	4,8	0,88	6,0	21,0	2,1	11.088.000
Marapendi	3,5	0,35	10,0	23,0	1,8	6.300.000

Com relação a Batimetria, estudos de Marques (1987 e 1999), citados por Fernandes (1991) e Moraes (2007), nas lagoas de Jacarepaguá, Camorim e Tijuca, indicam que 60% da área dessas três lagoas possuem profundidade inferiores a 1,0 m; 10% apresentam profundidade entre 1,0 m e 2,0 m e 10% possuem as maiores profundidade (entre 5,0 e 12,0 m). Em 2010, Benedetti (2011) registra que a lagoa de Jacarepaguá possui profundidade média de 3,02 m, o que não difere muito do dado correspondente na Tabela 4.1. Entretanto, resultados recentes (2015) da sondagem com percussão à trado (SPT) realizados ao longo do eixo central do canal de dragagem proposto para o sistema lagunar, indicam um lamina d'água com profundidade média de: 1,5 m na lagoa de Jacarepaguá; 2,1 m na lagoa de Camorim; 0,6 m na lagoa da tijuca; 1,0 m na lagoa de Marapendi; e 1,4 m para o canal da Joatinga (MASTERPLAN, 2015).

Um estudo sobre as mudanças espaço-temporais das lagoas da Tijuca e do Camorim conclui que entre 1975 e 2010 ocorreu uma redução de 15% da superfície do espelho d'água (JARA, 2014).

4.1.2. Aporte hídrico das lagoas

As lagoas são abastecidas por precipitação, escoamento superficial, águas fluviais e águas subsuperficiais provenientes de lençóis freáticos das encostas e marítimos. A troca de água como o mar ocorre na interligação da lagoa da Tijuca com canal da Joatinga ao leste, e ao oeste pelo canal de Sernambetiba, que atinge as lagoas de Marapendi e Jacarepaguá através do canal das taxas e canal do cortado, respectivamente.

Precipitação

A medição da precipitação nesta região hidrográfica pode ser realizada através das estações pluviométricas de Tanque, Rio Centro, Cidade de Deus e Itanhangá (transferida em 2013 para Barrinha) operadas pelo órgão municipal Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (GEO-RIO), com acesso no site: <http://alertario.rio.rj.gov.br/acumulados-mensais>.

Dados dos últimos 20 anos de monitoramento (1997-2016) informam que a média anual de precipitação das estações foi de 1.243,7 mm (com máxima de 1.764,4 mm em 2010 e mínima de 843,8 mm em 2014). Dezembro e Janeiro são meses de maior precipitação cujas médias indicam 145,3 mm e 166,8 mm, respectivamente. O valor máximo mensal de 482,0 mm foi registrado na estação de Itanhangá em janeiro de 2003. O período de maior seca ocorre nos meses de julho e agosto cujas médias são 68,2 mm e 45,3 mm. Em Julho de 2016 foi registrado 1,8 mm na estação de Tanque como sendo a menor precipitação mensal em 20 anos.

Águas Fluviais

Com relação as águas fluviais, o levantamento das vazões dos principais rios e canais das regiões hidrográficas tributárias de cada lagoa foram conduzidos por Medeiros (1982) apud Fernandes (1991), Marques (1990) apud Jara (2014) e por estudos ambientais elaborados pela Sondotécnica (1998), Superintendência Estadual de Rios e Lagos – SERPLA apud Moraes (2007), e MASTERPLAN (2013, 2014 e 2015) também citado por Santos (2014).

Mesmo com diferentes metodologias e distintos períodos hídricos de monitoramento (época de estiagem, valores diários, etc.), é possível observar no ANEXO 1, gerado a partir desses estudos, que a lagoa de Camorim, a menor em área, recebe dos rios Arroio Fundo e Anil a maior vazão média de água fluvial (cerca de 58% do total). A lagoa da Tijuca, abastecida por 4 regiões hidrográficas, apresenta um aporte de 29% das águas fluviais e ainda recebe a contribuição da lagoa de Camorim.

A lagoa da Tijuca sofre um grave processo de assoreamento, já que recebe o aporte de sedimentos e resíduos sólidos domésticos não apenas da bacia onde está inserida, mas também das lagoas de Camorim e Jacarepaguá e da maior parte dos rios da região (PROJCONSULT, 2011).

Troca hídrica com o mar

Os canais do Cortado e das Taxas, que ligam respectivamente a lagoa de Jacarepaguá e de Marapendí ao canal de Sernambetiba, têm atualmente uma troca hídrica extremamente precária, com assoreamento em alguns pontos e grande volume de macrófitas, evidenciando uma velocidade superficial de fluxo praticamente nula. Dados do relatório ambiental simplificado indicam que o canal das Taxas possui uma vazão de 0,0026 m³/s em período seco e 0,0046 m³/s em período chuvoso (MASTERPLAN, 2013).

Na desembocadura do canal da Joatinga, o trabalho de modelagem hidrodinâmica com o programa SisBAHIA® indica que na situação atual, sem dragagem e sem o molhe, a velocidade de corrente é em torno de 0,25 m/s e com pouca variação para as condições de vazante (fluxo em direção ao mar) e de enchente (fluxo em direção às lagoas) seja nos instantes de maré de sizígia²³ ou quadratura²⁴ (MASTERPLAN, 2015). Essa velocidade corresponde a praticamente 1/3 da velocidade de 0,7 m/s obtida na simulação realizada com dados batimétricos de 1977 por Falcão (1995).

²³ Marés de sizígia ocorrem nas luas nova e cheia, produzindo as maiores marés altas e as menores marés baixas.

²⁴ Marés de quadratura ocorrem nas luas crescente ou minguante, produzindo marés relativamente pequenas.

4.1.3. Enquadramento das águas

Com base na resolução nº 357/05 do CONAMA, as águas das lagoas são enquadradas como salobras (salinidade superior a 0,5 ‰ e inferior a 30 ‰) e definidas como classe 2, podendo ser destinada à pesca amadora e a recreação de contato secundário²⁵. Fernandes (1991) e Borma (1998) discutem a salinidade das lagoas e indicam que a lagoa de Jacarepaguá apresenta salinidade da ordem de 0,5‰, enquanto a lagoa de Camorim atinge valores de 0,9 ‰ e a da Tijuca alcança 3,5 ‰, que equivale a condutividade elétrica específica de 6,7 mS/cm e possuem maior variação devido a proximidade de troca com o mar.

As águas dos rios tributários do CLJ são enquadradas como águas doces (salinidade inferior a 0,5 ‰) e de classe 2 que podem ser destinadas ao consumo humano, após tratamento convencional, à proteção das comunidades aquáticas, à recreação de contato primário²⁶, à irrigação de hortaliças, à aquicultura e à atividade de pesca.

4.2. USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA BACIA HIDROGRÁFICA DE JACAREPAGUÁ

A bacia hidrográfica de Jacarepaguá contempla 18 (dezoito) bairros distribuídos nas 03 (três) regiões administrativas (Barra da Tijuca, Jacarepaguá e Cidade de Deus) que constituem a área de planejamento IV da cidade do Rio de Janeiro, conforme ilustração do ANEXO 2.

O histórico de ocupação dessa bacia hidrográfica se deve as obras de infraestrutura realizadas ao longo das últimas décadas que permitiram maior acesso e desenvolvimento da região.

Dentre essas obras destacam-se: a construção da avenida Niemeyer no início da década de 1920, a abertura da estrada do Joá em 1927 e a implantação da auto estrada

²⁵ O contato secundário é quando o contato com a água é esporádico ou acidental e a possibilidade de ingerir água é pequena, como na pesca e na navegação (CONAMA 357/2005).

²⁶ O contato primário é o contato direto e prolongado com a água na qual a possibilidade do banhista ingerir água é elevada (CONAMA 357/2005).

Lagoa-Barra com as obras do elevador e túneis que ligaram definitivamente a Zona Sul à Região Oeste na primeira metade da década de 1970.

Calheiros (2006) relata que ainda na década de 1970 o plano piloto da região, estabelecido por Lucio Costa em 1950, começou a ser implantando, sendo constituído principalmente pelas atuais vias: Av. Lúcio Costa, Av. das Américas e Av. Embaixador Abelardo Bueno, Av. Ayrton Senna e Av. Salvador Allende.

No final da década de 1990 ocorreu a consolidação de acesso à essa Região Oeste pela Zona Norte com a construção da Linha Amarela e seus túneis.

Nos últimos anos, o avanço no sistema de mobilidade urbana ampliou o acesso à região com a implantação das vias expressas para o transporte coletivo BRT (*Bus Rapid Transit*) por meio da TransOeste (2012), TransCarioca (2014) e TransOlímpica (2016) e com a linha 4 do metrô (2016).

Desta forma, a expansão urbana da região, iniciada na década de 1940 com a aprovação dos primeiros loteamentos intitulados Tijucamar e Jardim Oceânico, não parou de crescer. Freitas (2009) registrou com dados do IPP (Instituto Pereira Passos) que durante o período compreendido entre 1970 a 2000 (30 anos) a área de planejamento IV apresentou um crescimento populacional de 141%, enquanto que o município do Rio de Janeiro teve crescimento de 37,8%.

Atualizando esses dados para o período compreendido entre 1970 e 2016, a população do município do Rio de Janeiro cresceu 50,58% enquanto que a área de planejamento IV teve um crescimento populacional de 347,24% (quase 3,5 vezes mais), alcançando atualmente uma população estimada de 1.077.930 habitantes (IBGE, 2010).

4.2.1. Impactos hídricos da ocupação antrópica

O avanço dessa ocupação antrópica na região, sem a implantação do saneamento básico e sem um adequado uso e ocupação do solo, compromete a qualidade dos corpos hídricos, tendo em vista o lançamento de rejeitos industriais e domésticos e o carreamento de sedimentos na drenagem mediante a erosão e aumento do escoamento superficial devido ao desmatamento (Cypriano, 2009).

A descarga desses materiais, em quantidades superiores à capacidade de depuração ou de eliminação de tais rejeitos, provoca alterações físicas, químicas e biológicas que diminuem ou mesmo impossibilitam o uso do corpo hídrico para pesca, recreação e lazer. Inclusive, o carreamento de sedimento para as lagoas e a deposição da parte sólida do esgoto e dejetos no fundo das lagoas promovem o assoreamento com conseqüente perda da coluna d'água, prejudicando o uso do corpo hídrico até como via de transporte.

Devido à limitada troca de água com o oceano, Kjerfve e Knoppers (1999) classificam geomorfologicamente esses tipos de lagoas, como “lagunas sufocadas” por ser um ambiente lagunar de baixa hidrodinâmica, com alto potencial de acumulação de sedimentos, de eutrofização e poluição devido aos impactos antrópicos gerados.

Dias (1999) esclarece que das 106 comunidades de baixa renda existentes na baixada de Jacarepaguá, cerca de 60% ocupam margens de rios, canais ou lagoas. Isso repercute na retirada de biota marginal, maior aporte de carga orgânica por esgotos e repercute também no incremento no lançamento de lixos, com conseqüente avanço da poluição e assoreamento.

Os trabalhos de Riguetti (2009), Freitas (2009), Salloto et al. (2012), Santos (2014) e Rebelo (2016) constataam poluição hídrica no complexo lagunar de Jacarepaguá. Sampaio (2008) e Cruz et al. (2012) acrescentam que essa poluição têm gerado mortes extensivas de peixes e maior incidência de florações de microalgas, particularmente de cianobactérias. Araujo (2007) relaciona aspectos de saúde pública com a degradação dos corpos hídricos na região.

No intuito de gerar melhorias para o CLJ, estudos de hidrodinâmica ambiental como os de Falcão (1995), Morais (2007) e Rosman (2012) recomendam que intervenções sejam feitas no sentido de sanear, dragar e permitir maior ligação lagoa-mar.

4.2.2. Histórico do Saneamento na região

Até o início dos anos 70 a ocupação ainda era rarefeita com residências e edifícios localizados principalmente à orla marítima. Essas edificações utilizavam fossas e sumidouros como sistema de esgotamento privado. A partir de 1972 um decreto municipal obrigou edifícios e condomínios com mais de 40 unidades habitacionais

instalarem estações de tratamento independentes para que os efluentes pudessem ser lançados de forma segura nos corpos hídricos. Dados da CEDAE citados por Freitas (2009) apontam que até o início dos anos 2000 existiam cerca de 300 unidades de tratamento de esgoto particulares na bacia hidrográfica.

Em 1981 a Associação de Moradores e Amigos da Barra da Tijuca, AMABARRA, questiona o modelo de tratamento do esgoto na região e passa a reivindicar a implantação de um sistema integrado.

Em 1986, após inúmeras discussões, decidiu-se pela construção do emissário submarino na Barra da Tijuca, juntamente com uma estação de tratamento preliminar de esgoto (SILVA, 2006).

Em 1990 foram estabelecidos os critérios básicos para execução do projeto e em 1991 é instituído o Sistema de Esgotamento Sanitário do Município do Rio de Janeiro, por meio do Decreto nº 10.082/91.

Em 2001, após longa disputa de competência entre prefeitura e governo do estado para execução das obras, foi iniciada a implantação do Programa de Despoluição e Saneamento Básico da Baixada de Jacarepaguá (PSBJ) projetado para o horizonte de 30 anos com capacidade final de tratar 5.300 l/s de esgoto.

Esse programa teve suas obras interrompidas e adiadas várias vezes, mas em 2009 foi entregue a primeira fase com a operação da Estação de Tratamento de Esgoto da Barra da Tijuca (ETE – Barra) e funcionamento do emissário terrestre e submarino, concluído em 2007 para lançamento de esgoto tratado a 5000 m da costa e a 45 metros de profundidade.

O sistema de esgotamento sanitário da região contempla ainda sub-bacias de saneamento compostas por redes de coletoras, linhas de recalques e estações elevatórias que conduzem os efluentes para a ETE-Barra e emissário. O sistema que vem sendo implantado há 15 anos, possui 43.862 ligações domiciliares e tratamento de 1.600 l/s de esgoto (CEDAE, 2016). No ANEXO 3 demonstra-se um esquema do esgotamento sanitário da Barra da Tijuca, Recreio dos Bandeirantes e Jacarepaguá, com indicação das sub-bacias e estado de execução dos componentes sanitários.

Com o propósito de promover a recuperação ambiental do CLJ e devido à complexidade do saneamento em algumas comunidades/favelas, o estado e a prefeitura preveem executar a construção de 4 (quatro) Unidades de Tratamento de Rios (UTR), a serem implantadas no rio do Anil (1.000 l/s), rio das Pedras (330 l/s), rio Arroio Pavuna (1.000 l/s) e rio Pavuninha (330 l/s), a exemplo da UTR do rio Arroio Fundo que operou de forma provisória nos jogos do pan-americano em 2007 e de forma definitiva em 2010 (capacidade 1.800l/s) sob responsabilidade da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro (Figura 4.5).



Figura 4.5 - Localização estimada das Unidades de Tratamento de Rios (UTR's) (PROJCONSULT, 2011)

4.3. HISTÓRICO DE DRAGAGEM NA REGIÃO

Na década de 1970 o extinto Departamento Nacional de Obras e Saneamento (DNOS) efetuou obras de desvios, alargamentos e retificação de corpos hídricos na região administrativa IV, proporcionando escoamentos diretos das águas para as lagoas (Marques, 1990 apud Ferreira e Cunha, 1996).

As dragagens de extração de areia para uso em aterros e construções de condomínios residenciais na região, são comentadas por Fernandes (1991). O autor cita inclusive a extração às margens da lagoa de Jacarepaguá para as obras de construção e readaptação do antigo autódromo Internacional de Jacarepaguá²⁷. Nessa mesma lagoa, o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) embargou em 2002 uma dragagem conduzida pela Superintendência Estadual de Rios e Lagos (SERLA) por meio de convênio com as empresas Gafisa, Plarcon e Éster Engenharia, alegando que o material granular dragado estava sendo utilizado comercialmente para aterro hidráulico, enquanto o material fino era lançado em cavas existente na área. Há registros também de que a extração de areia, fomentada pela expansão imobiliária, ocorria em área próxima à lagoa de Marapendi, onde atualmente foi instalado o campo de golfe.

Essas dragagens de mineração que visavam a extração de areia no complexo lagunar de Jacarepaguá foram proibidas no final de 2003 por meio do decreto estadual nº 34.454/2003. Somente em 2011 o decreto estadual nº 42.840 /2011 revoga a proibição e passa a disciplinar as ações de desassoreamento da bacia. Neste mesmo ano, Araruna Júnior et al. (2012) citam que a empresa Interdraga consultoria e serviços de dragagem Ltda. efetuou caracterização de sedimentos da lagoa de Jacarepaguá afim de definir o melhor local de extração de areia para a construção da cidade do Rock.

Em fevereiro de 1996, quando a precipitação atingiu 340 mm em 24h, a maior em 25 anos²⁸, uma grande enchente catastrófica ocorreu na região de Jacarepaguá. Então, em caráter de remediação e manutenção devido ao assoreamento, em junho do mesmo ano, o governo do estado por meio da Superintendência Estadual de Rios e Lagos (SERLA) inicia as obras emergenciais de dragagem, canalização e alargamento no rio Anil, rio Arroio Fundo e lagoa Camorim (7.000 m³). Em seguida, a retirada de mais 310.000 m³ de sedimentos ocorre em parte da lagoa da Tijuca, atingindo uma profundidade máxima dragada de 3,0 m, definido como valor típico de lagoas tropicais.

²⁷ O autódromo Internacional de Jacarepaguá foi construído em 1966, reformado em 1977, reduzido para acomodar os jogos Pan-americanos de 2007 e demolido em 2012 para instalação do parque olímpico de 2016.

²⁸ No período de 1970 a 1995 o monitoramento pluviométrico na região indica que apenas 7 dias atingiram marcas superiores a 150 mm e 3 dias com marcas acima de 200 mm (FERREIRA; CUNHA, 1996).

O material dragado de caráter emergencial apresentava cerca de 10 a 15% de sólido e foi disposto temporariamente na forma de aterro hidráulico em duas áreas à margem das lagoas, cuja localização e características das áreas de disposição são observadas na Figura 4.6. Parte do líquido deslocado durante a sedimentação do material retornava para a lagoa ou evaporava e o remanescente ficava disponível para infiltração no solo durante o processo de adensamento. Decorrido o prazo de 6 meses, o sedimento trincado por ressecamento era removido com retroescavadeira, empilhado e transportado para reaproveitamento em terraplanagem (Borma, 1998).

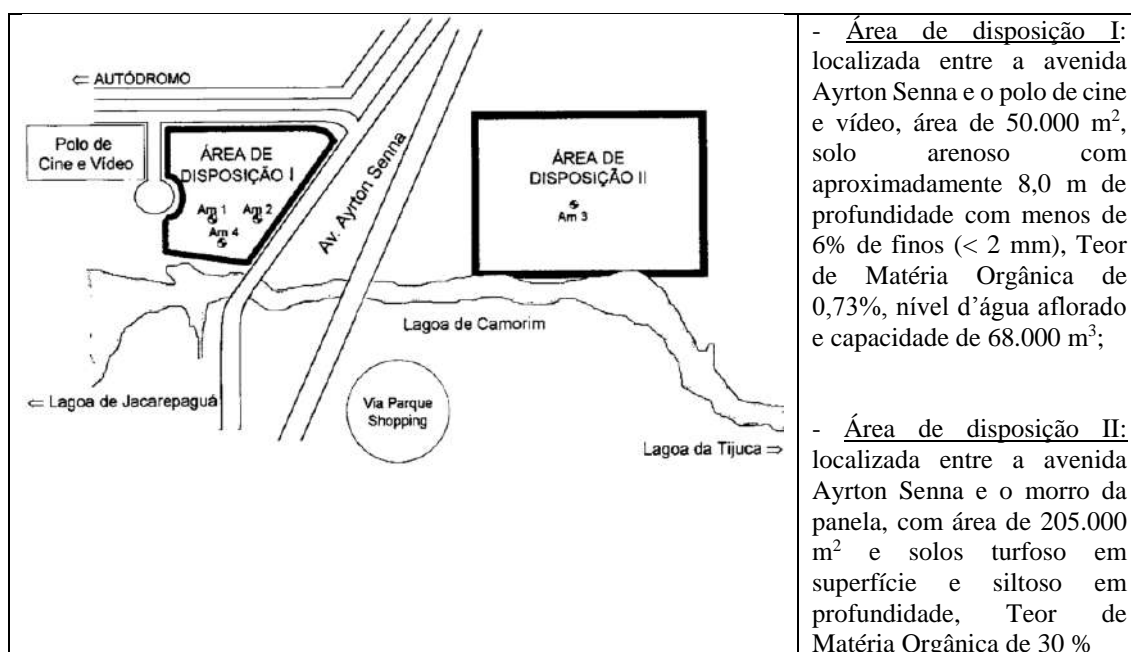


Figura 4.6 - Esquema e características das áreas de disposição da dragagem iniciada em 1996 (adaptado de Paula, 1999)

Ainda no ano de 1996, a Prefeitura cria o Programa de Reabilitação Ambiental da Baixada de Jacarepaguá, com o objetivo de prevenir enchentes e contribuir para a despoluição das lagoas. Esse programa propõe obras de macrodrenagem que compreendem: execução de dragagem e canalização dos rios de maior porte da bacia (cerca de 40 rios) que totalizam aproximadamente 124 km de extensão; dragagem das lagoas da Tijuca, Camorim e Jacarepaguá; construção e recuperação de 40 pontes; criação de 7 km de avenidas canais para interligar o sistema viário existente; reassentamento de famílias, reflorestamento e ações de educação ambiental (DIAS, 1999).

Para atuar no gerenciamento dessas atividades de manejo das águas pluviais, bem como elaborar estudos e projetos de drenagem que visam eliminar pontos críticos de alagamento, o município cria em 1998 a Fundação Instituto das Águas do Município do

Rio de Janeiro (Rio-Águas). Neste mesmo ano, a secretaria municipal de Meio Ambiente (SMAC) recebe da empresa contratada, Sondotécnica Engenharia de Solos Ltda., o Estudo de Impacto Ambiental do projeto de recuperação ambiental da macrobacia de Jacarepaguá, com ênfase nos diagnósticos físico, biótico e socioeconômico da região, permitindo melhor planejamento das ações de intervenção nos corpos hídricos.

Visando continuidade no processo emergencial de desobstrução da lagoa da Tijuca, a prefeitura inclui a dragagem como item do Termo de Ajuste e Compromisso Urbanístico e Ambiental (TAC), celebrado em julho de 1999, com a construtora Carvalho Hosken Engenharia para permissão de empreendimentos imobiliários na península. Em 2002 a Superintendência Estadual de Rios e Lagos (SERLA) também fez convênio com a Carvalho Hosken Engenharia para reforçar a condução da dragagem emergencial na lagoa da Tijuca. Contudo, somente após estudo da circulação hidrodinâmica e dragagem no sistema lagunar da baixada de Jacarepaguá, realizado em 2004 pelo Departamento de Engenharia Oceânica da COPPE/UFRJ, que se inicia a execução do chamado Projeto LagoAmar, baseado na ligação da lagoa com o mar.

A primeira fase deste projeto compreendeu a dragagem de rios que desembocam no complexo lagunar e a abertura de um canal na lagoa da Tijuca com 1.800 m de comprimento, 144 m de largura e 3 m de profundidade. Nesta fase ocorre embargo do IBAMA devido à falta de licenciamento, mas o volume dragado chegou próximo de 1,0 milhão m³, cuja destinação autorizada pela FEEMA foram as cavas de 10 m na região do saco grande e a área localizada próxima a lagoa Camorim, entre a avenida Ayrton Senna e canal do rio Pavuna, conforme indica Figura 4.7.

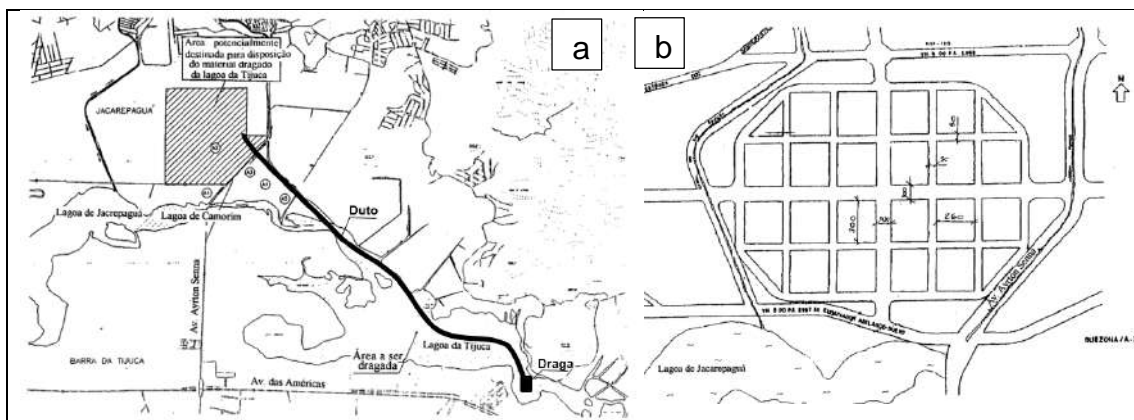


Figura 4.7 - Local de disposição dos sedimentos dragados na lagoa da Tijuca de 2004 a 2006: (a) Trajeto do duto transportador do sedimento dragado para área de disposição (b) Projeto das células previstas na área de disposição (SMAC, 1998 apud Lerner, 2000).

De acordo com o estudo de impacto ambiental elaborado pela empresa COHIDRO consultoria, estudos e projetos Ltda, a segunda fase contemplou a dragagem no canal do cortado interligando-o ao canal de Sernambetiba para acesso ao mar. A terceira fase, não executada, corresponde a construção do molhe na foz do Canal de Sernambetiba na Praia da Macumba. Portanto, durante o período de 2004 a 2006 foram efetuadas dragagens do projeto LagoAmar, supervisionadas pela SERLA.

Após a dragagem emergencial de 1996 e as dragagens parciais do projeto LagoAmar de 2004 a 2006, a proposta de se efetuar uma dragagem ampla no Complexo Lagunar de Jacarepaguá é incluída no dossiê de candidatura da cidade à sede dos jogos olímpicos de 2016.

Escolhida em outubro de 2009 como cidade sede da Olimpíada de 2016, a recuperação ambiental do CLJ, constante do caderno de encargos, passa a fazer parte dos compromissos assumidos e assim, começam os esforços para se executar a obra, cujos principais eventos podem ser observados cronologicamente na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Síntese cronológica de eventos para licenciamento e execução da dragagem no CLJ (elaboração própria)

	DATA	EVENTO
2011	Junho	Empresa Projconsult elabora o Relatório do Projeto Básico de Recuperação Ambiental do Complexo Lagunar da Baixada de Jacarepaguá, conforme contrato 01/2011 com a Secretaria de Estado do Ambiente (SEA).
	Novembro	SEA requereu ao INEA o licenciamento ambiental das obras de recuperação ambiental do CLJ, orçadas em R\$ 673 milhões.
2012	Fevereiro	INEA emite Instrução técnica para elaboração de Relatório Ambiental Simplificado (RAS)
	Junho	Governo estadual contrata empréstimo no valor de R\$ 302,8 milhões do Banco do Brasil e pleiteia o restante junto ao Governo Federal para a dragagem.
	Outubro	INEA emite complemento aos itens da Instrução técnica para elaboração do Relatório Ambiental Simplificado (RAS) conforme recomendação do MP-RJ
2013	Março	SEA apresenta ao INEA o Relatório Ambiental Simplificado (RAS) elaborado pela empresa Masterplan para licenciamento
	Maio	INEA emite a Licença Prévia nº IN 23016 para atividade
	Junho	SEA homologa resultado da licitação declarando como vencedor o Consórcio Complexo Lagunar (CCL) formado pelas empresas: Construtora Queiroz Galvão S.A. Construtora OAS S.A. e Construtora Andrade Gutierrez S.A.
	Julho	SEA suspende licitação devido a indícios de sobrepreço encontrado pelo tribunal de contas da união e denúncias de formação de cartel.
2014	Fevereiro	SEA cancela a suspensão após alegar curto prazo para cumprir compromisso olímpico.
	Agosto	Empresa Masterplan elabora para a SEA o Plano Básico Ambiental (PBA) (condicionante da LP)
	Setembro	MPF emite recomendação nº 05 para que anule a Licença ambiental emitida e suspenda a execução das obras sem o devido EIA RIMA e sem a manifestação de órgão federais (IBAMA, ICMBio, SPU e Marinha do Brasil).
2015	Fevereiro	SEA anuncia que dragagem não será executada dentro da data prevista para os jogos olímpicos
	Maio	SEA assinou um termo de Ajustamento de conduta com o MP-RJ e o MPF exigiu o EIA/RIMA para atividade
	Setembro	Empresa Masterplan elabora para a SEA o EIA/RIMA
2016	Setembro	SEA suspende o contrato de dragagem no CLJ devido à crise financeira do estado e arrestados dos recursos para pagamento da folha salarial.
	Outubro	INEA realizada audiência pública do EIA/RIMA (12ª “reunião pública” sobre o tema)

Durante todo esse processo, as propostas de dragagem e destinação do sedimento foram sendo modificadas. No Relatório Ambiental Simplificado (RAS) de 2013 se previa a extensão de 225 m do molhe no canal da Joatinga, criação de uma ilha parque na lagoa da Tijuca e a dragagem de 5.863.405,0 m³ de sedimento (MASTERPLAN, 2013). O EIA /RIMA elaborado em 2015 mantém a extensão do molhe, mas não consta a criação da ilha parque e apresenta uma dragagem de aproximadamente 15,0 km de canais perfazendo um volume de 4.887.019,0 m³, ou seja, cerca de 17 % menor (MASTERPLAN, 2015). A previsão do volume de sedimento *in situ* a ser dragado por ambiente lagunar e suas características principais são identificados Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Volume e características dos sedimentos a serem dragados por ambiente lagunar (elaborado a partir de MASTERPLAN, 2015)

Ambiente lagunar	Volume de sedimento a dragar (m ³)	Características do sedimento
Canal de Joatinga	320.207,0	- Solo arenoso de baixa compactidade; - umidade entre 25% a 50%, - TMO < 10%; - ângulo de atrito efetivo de $\phi=26,5$ graus.
Lagoa da Tijuca	1.853.153,0	- solo predominantemente argiloso muito mole; - umidade até 350%; - TMO < 20%; - ângulo de atrito efetivo de $\phi=3,8$ graus.
Lagoa de Camorim	210.216,0	- solo predominantemente siltoso e 18% orgânicos; - umidade até 284%; - TMO < 15%; - peso específico médio do solo mole de 13kN/m ³ ; - ângulo de atrito efetivo de $\phi=3,8$ graus.
Lagoa de Jacarepaguá	947.222,0	- solo predominantemente arenoso na seção de dragagem e detectado regiões argilosas e siltosas; - umidade até 776% em regiões argilosas - TMO de 10 a 30%, - ângulo de atrito efetivo de $\phi=3,8$ graus.
Lagoa de Marapendi	1.556.221,0	- solo com predominância de solos compostos com areia em alguns casos com argila; - umidade de 40% a 400%; - TMO < 30%; - ângulo de atrito efetivo de $\phi=35,0$ graus.
Total	4.887.019,0	

Contudo, a maior alteração entre os estudos se deve à destinação do material dragado. O Relatório Ambiental Simplificado (RAS) de 2013 previa disposição terrestre de maior parte do sedimento dragado e indicava o uso de sistema fechado de geotêxtil para formação da ilha (MASTERPLAN, 2013). No entanto, no Estudo de Impacto Ambiental e respectivo Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) de 2015 optou-se pela disposição em cavas dentro das lagoas, seja de forma direta ou utilizando a disposição terrestre temporária (bota-espera) em sistema fechado de geotêxtil com vista à desidratação e redução de volume para posterior lançamento (MASTERPLAN, 2015).

A Tabela 4.4 indica os locais e capacidade de disposição, enquanto a Figura 4.8 e Figura 4.9 ilustram as áreas de disposição abordadas nos dois estudos (RAS e EIA/RIMA).

Tabela 4.4 - Relação de áreas de disposição de material dragado em estudos ambientais (elaborado a partir de MASTEPLAN, 2013 e MASTERPLAN, 2015)

RAS (2013)		EIA / RIMA (2015)	
Local de disposição	Capacidade	Local de disposição	Capacidade
Formação de Ilha (Tijuca)	1.347.598,00 m ³	Bota espera 1 (Tijuca)	107.652,44 m ²
Centro Metropolitano	1.961.566,00 m ³	Bota espera 2 (Jacarepaguá)	134.424,59 m ²
Marapendi	2.238.715,00 m ³	Bota espera 3 (Marapendi)	78.876,98 m ²
Pedra da Panela A (opcional)	996.000,00 m ³	Cavas na lagoa de Jacarepaguá	2.258.803,00 m ³
Pedra da Panela B (opcional)	628.518,00 m ³	Cavas na lagoa da Tijuca	1.359.922,00 m ³



Figura 4.8 - Áreas previstas no RAS (2013) para disposição dos sedimentos dragados. (MASTERPLAN, 2013)



Figura 4.9 - Áreas previstas no EIA/RIMA (2015) para disposição do sedimento dragado (MASTERPLAN, 2015)

Com relação as obras de macrodrenagem conduzidas pela Rio-Águas no programa de reabilitação de bacia para se evitar enchentes, observa-se que as dragagens e canalizações dos rios afluentes se arrastam por mais de 15 anos. Dados do plano municipal de saneamento básico de 2015, relativo a drenagem e manejo de águas pluviais urbanas, prevê a intervenção de 14 rios com previsão de 810 mil m³ de material a ser retirado por dragagem, conforme se observa na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Macrodrenagem da Bacia de Jacarepaguá: Rios, volume de dragagem e custos previstos (elaborado a partir de SMAR, 2015)

RIO	Dragagem (m³)	Valor Previsto (R\$)
Rio Sangrador	62.374,26	30.320.949,74
Rio do Retiro	34.800,30	10.050.061,80
Rio Cachoeira	145.556,00	16.971.756,80
Rio Itanhangá e Amendoeira	10.374,00	11.234.886,44
Rio Muzema	2.371,87	3.040.223,84
Rio São Francisco	73.741,42	18.120.989,36
Córrego da Panela	4.834,96	7.099.171,35
Rio Papagaio	13.104,47	13.777.360,21
Rio Convaca	34.979,32	18.532.174,79
Rio Pechincha	24.521,49	8.249.634,67
Rio Banca da Velha	57.814,19	11.057.183,91
Rio Timbida	95.277,42	39.019.069,68
Rio Pequeno	92.305,70	21.695.891,23
Rio Grande	158.652,16	97.226.313,19
TOTAL	810.707,56	306.395.667,01

Dentre as ações paliativas utilizadas para reduzir o aporte de contaminantes nas lagoas e a retenção de gigogas, merecem destaque a instalação de ecobarreiras iniciada em 2006 no canal do Arroio Fundo. Essas ecobarreiras consistem em redes coletoras estendidas transversalmente nas calhas dos rios que impedem a passagem de grande parte do lixo flutuante proveniente das comunidades locais. Na bacia hidrográfica de Jacarepaguá foram instaladas 07 ecobarreiras (canal do Arroio Fundo, Rio das Pedras, canal de Sernambetiba, lagoa da Tijuca, lagoa Camorim, lagoa Marapendi, lagoa de Jacarepaguá).

4.4. CONCLUSÕES PARCIAIS

Este capítulo apresentou características do aporte hídrico no complexo lagunar de Jacarepaguá e os impactos de poluição e assoreamento sofridos devido ao processo de ocupação antrópica da bacia hidrográfica sem infraestrutura sanitária adequada.

No relato das medidas de esgotamento sanitário na região destacou-se o Programa de despoluição e saneamento básico da Baixada de Jacarepaguá (PSBJ) iniciado em 2001. De acordo com a CEDAE (2016) em 15 anos foram implantadas as rede coletoras, linhas de recalques e estações elevatórias que conduzem a ETE-Barra que opera com tratamento de 1.600 l/s para lançamento no emissário. Aliado a esse propósito de despoluição encontra-se a Unidade de Tratamento de Rio (UTR) no rio Arroio Fundo com capacidade de 1.800 l/s e as ecobarreiras instaladas em 07 pontos da bacia hidrográfica. Contudo essas medidas ainda não são suficientes para a despoluição deste Complexo Lagunar.

Com relação ao histórico de dragagem das lagoas, foram observadas a dragagem emergencial de 1996 e as dragagens parciais do projeto LagoAmar de 2004 e 2006. Na sequência, detalhou-se a saga do licenciamento ambiental para implantação do projeto de recuperação ambiental do CLJ, assumido em 2009 como compromisso olímpico de 2016 e não cumprido. Os estudos ambientais apontaram a dragagem de 4.887.019,0 m³ de sedimentos e propuseram uso de sistema geotêxtil fechado como parte de destinação do material dragado.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. COLETA E PRESERVAÇÃO DE AMOSTRAS

5.1.1. Definição dos pontos de coleta

Para a definição dos pontos de coleta observou-se, nos estudos ambientais do empreendimento de despoluição do complexo lagunar de Jacarepaguá, o local com as piores características de contaminação do sedimento por metais.

Os estudos ambientais observados foram: o Projeto Básico de Recuperação realizado pela empresa Projconsult em junho de 2011 e o Relatório Ambiental Simplificado elaborado pela Masterplan em outubro de 2014. Ao todo foram verificadas 129 amostras caracterizadas, proveniente de 250 estações de coleta, cuja distribuição é apresentada na Tabela 5.1

Tabela 5.1 - Número de Estações de Coleta para amostragem dos sedimentos nos estudos ambientais do Completo Lagunar de Jacarepaguá

Local	(Estudo de 2011)	(Estudo de 2014)	
	Estações de coleta	Estações de coleta	Unidades de caracterização de dragagem
Lagoa de Jacarepaguá	15	41	16
Lagoa de Camorim	5	19	6
Lagoa da Tijuca	19	73	27
Lagoa de Marapendi	17	28	9
Canal da Joatinga	6	27	9
TOTAL	62	188	67

Algumas estações de coleta demonstraram concentrações acima do valor de referência nível 1 da resolução nº 454/12 do CONAMA para o chumbo, cobre, níquel e zinco.

A lagoa da Tijuca, especificamente, cuja análise dos pontos de coleta e das concentrações dos metais estão relatados no ANEXO 4, indicou maiores valores de contaminação por metais nas regiões próximas as Unidade de Caracterização de Dragagem - UCD 06, 07, 13 e 16.

Considerando as condições de acesso da embarcação, o local de coleta definido para este trabalho compreendeu as estações que compõem a UCD 16, cujas coordenadas são apresentadas na Tabela 5.2 e visualizadas de forma ilustrativa na Figura 5.1

Tabela 5.2 - Coordenadas do local de coleta do material na Lagoa da Tijuca

Unidade de Caracterização de dragagem (UCD)	Estação de Coleta	Coordenadas geográficas	
		Latitude	Longitude
16	12	22°59'39.61"S	43°19'31.29"O
	13	22°59'37.62"S	43°19'36.55"O
	14	22°59'35.51"S	43°19'42.37"O



Figura 5.1- Vista da lagoa da Tijuca com indicação da região de coleta do material (ilustrativo)

5.1.2. Procedimento de coleta e preservação das amostras

Para obter sedimentos de dragagem a serem confinados experimentalmente em um sistema geotêxtil fechado buscou-se inicialmente a parceria com o Consórcio Complexo Lagunar (CCL) formado pelas empresas Queiroz Galvão, OAS e Andrade Gutierrez, tendo em vista que esse consórcio havia assinado contrato (11.03.2014) com a Secretaria Estadual de Meio Ambiente do Rio para execução das obras de despoluição das Lagoas de Jacarepaguá/RJ. Contudo, devido a entraves jurídicos e questões de licenciamento ambiental, a constante postergação do início das obras de dragagem

fizeram com que se optasse pela realização da coleta com equipe geotécnica especializada da COPPE/UFRJ.

Para cumprimento desta etapa observou-se os critérios estabelecidos no Guia Nacional de coleta e preservação de amostras (CETESB, 2011) e verificou-se o uso de metodologias similares nos trabalhos de Borma (1998), Castiglia (2006) e Monteiro (2008).

A coleta de material (sedimento e água) com volume suficiente para caracterização, enchimento experimental de sistema geotêxtil fechado e ensaios preliminares para a dosagem de polímero foi realizada em duas campanhas com embarcação de baixo calado, para facilitar o deslocamento, e com auxílio de GPS, para identificação dos pontos de amostragem. Na Tabela 5.3 encontram-se as datas e quantidades de material coletado.

Tabela 5.3 - Datas das campanhas de coleta e quantidades do material (sedimento e água)

Data	Quantidade de Sedimento	Quantidade de água
26/03/2015	6 bombonas de 100 l (33 sacos de aprox. 30 kg cada)	30 bombonas de 20 l
18/10/2015	Sem coleta	30 bombonas de 20 l

O sedimento foi coletado por meio de trado manual e de equipamento Ekman-Birge (Figura 5.2) com manejo a partir da polpa da embarcação. As profundidades das amostras variaram até 1,0 metro, ou seja, camada superficial e objeto de dragagem.



Figura 5.2 - Equipamentos de coleta do sedimento (Trado manual e pegador Ekman-Birge)

As amostras de sedimento foram acondicionadas de forma bem vedada em sacos plásticos identificados, colocados dentro de bombonas plásticas de 100 litros (Figura 5.3)

e conduzidos para câmara úmida do laboratório de geotecnia da COPPE/UFRJ com vista à caracterização geotécnica. Uma parcela representativa foi conduzida para câmara frigorífica a 4°C visando a caracterização físico-química.

A água coletada foi armazenada em bombonas plásticas de 20 litros (Figura 5.3) e conduzida para câmara frigorífica a 4°C do laboratório de geotecnia da COPPE/UFRJ. Algumas amostras foram armazenadas em recipientes específicos e conduzidas diretamente para as análises, enquanto parâmetros como pH, OD e temperatura foram medidos diretamente em campo.



Figura 5.3 - Forma de acondicionamento do material coletado (sacolas plásticas, bombonas e recipientes para laboratórios de análises)

5.2. PARÂMETROS GEOTÉCNICOS E MÉTODOS ANALÍTICOS

5.2.1. Massas, pesos e densidades específicas

A massa específica natural do solo (ρ_n), que indica a razão entre a massa do solo e o volume total, pode ser determinada por ensaios *in situ*²⁹ e em laboratório³⁰. Neste trabalho, foi empregado o procedimento utilizado por Borma (1998) e Castiglia (2006), onde triplicatas de amostras representativas preencheram recipientes cilíndricos de PVC (Figura 5.4). Esse conjunto, cilindro e sedimento, tiveram massa aferida e a umidade determinada por meio da massa seca em estufa de 60 ° C até valor constante. As autoras alertam que embora esse método não reflita a situação real de campo, devido a forma de coleta e preenchimento da amostra, o valor pode ser usado apenas como referência.

Dados dos recipientes:	R1	R2	R3
Volume do cilindro (cm ³)	439,17	439,21	439,15
Massa da base (g)	79,18	79,21	79,17
Massa do cilindro (g)	179,97	179,99	179,96
Massa cilindro e base (g)	259,15	259,20	259,13

Figura 5.4- Características dos cilindros para análise da massa específica aparente natural

A massa específica aparente seca (ρ_d), que indica a razão entre a massa dos sólidos e o volume total, não é determinada em laboratório, é calculada a partir da umidade gravimétrica sob a base seca (w_d) e a massa específica natural (ρ_n) conforme equação 5.1.

$$\rho_d = \frac{\rho_n}{1 + w_d} \quad 5.1$$

A massa específica real do grão (ρ_s), definida como a razão entre a massa dos sólidos e o volume dos sólidos, é obtida após a eliminação do volume de vazios da amostra com picnômetros, cujos ensaios são definidos pela NBR 6508/84 e ME 093/94 do DNER. Neste trabalho os ensaios foram realizados em triplicata e com base nos

²⁹ O método de cilindro de penetração (NBR 9813/87), método de frasco de areia (NBR 7185/86), método de balão de borracha e método do óleo grosso são realizados no campo.

³⁰ O método de torrão coberto com parafina, método da imersão em mercúrio e método do tubo de Shelby são realizados em laboratório.

procedimentos da NBR 6508/84, utilizando portanto: amostras equivalentes a 50 g de sedimento seco menores que 2,0 mm (#10), picnômetros de 250 ml e chapa de aquecimento, conforme Figura 5.5.



Figura 5.5 - Ensaio de determinação da massa específica dos grãos com picnômetros

De acordo com Pinto (2006) as massas específicas (ρ) são expressas em t/m^3 ou g/cm^3 , mas na prática da engenharia é conveniente trabalhar com pesos específicos (γ), efetuando o produto da respectiva massa pela aceleração da gravidade (simplicadamente $10 m/s^2$) e obtendo valores em kN/m^3 .

A densidade relativa dos grãos (D_r), expressa de forma adimensional, foi definida pela razão entre a massa específica real dos grãos e a massa específica da água a $4^\circ C$. Diferencia-se da densidade real dos grãos (G_s) que considera a massa específica real dos grãos vezes a aceleração da gravidade, obtendo-se valores em kN/m^3 .

5.2.2. Teor de umidade

Para determinação do teor de umidade sobre a base seca (w_d) (geotécnica), que relaciona a porcentagem da massa de água com relação a massa do solo seco, utilizou-se estufa a $60^\circ C$ para secagem do material em triplicata até o peso constante, conforme diretrizes do anexo da ABNT NBR 6457/86 e item 6.3 da norma técnica L6160/95 da CETESB.

A verificação do teor de umidade sobre a base úmida (w_w) (ambiental) pôde ser obtida com a correlação indicada por Alcântara (2007) a partir da equação 5.2

$$w_w = \left(\frac{w_d}{100 + w_d} \right) * 100 \quad 5.2$$

5.2.3. Granulometria

Diversos métodos podem ser utilizados para se efetuar a análise granulométrica de um material. O guia de práticas sedimentométricas destaca que para sedimento pode-se utilizar o peneiramento, a sedimentação com densímetro, a pipetagem, tubo de acumulação visual, tubo de retirada pelo fundo e a difração a laser (Carvalho et al., 2000). Quanto aos aspectos normativos, verifica-se que a NBR 7181/84 exhibe procedimentos para peneiramento e sedimentação com densímetro. A norma técnica L6.160/95 da CETESB indica um método de determinação granulométrica com pipetagem específico para os sedimentos e a ISO 13.320 aborda os critérios para análise de tamanho de partícula por difração a laser.

De acordo com USEPA (2001) as determinações do tamanho de partículas podem ainda excluir o material orgânico (distribuição verdadeira) por meio da oxidação usando peróxido de hidrogênio ou manter o material orgânico (distribuição aparente). A mesma fonte informa que a distribuição aparente e o método de sedimentação de partículas são preferidos no dimensionamento de sedimentos e foram adotados neste trabalho, que seguiu os procedimentos definidos pela NBR7181/84.

O procedimento preliminar de preparação da amostra para ensaios de caracterização granulométrica compreendeu o peneiramento inicial na peneira nº 10 (# 2mm), conforme estabelecido pela NBR 7181/84. Em seguida, os materiais retidos, constituído prioritariamente por fragmentos de conchas, pequenos plásticos e gravetos (Figura 5.6) foram descartados com base no manual técnico da USEPA (2001) que não os caracterizam como sedimento. Esses materiais apresentaram percentual inferior a 0,30% como se observa na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Percentual de conchas das amostras de sedimento

Amostras compostas	># 2mm (%) (Conchas e etc.)
AC - Estação 12	0,24
AC - Estação 13	0,10
AC - Estação 14	0,28
AC - Mistura	0,22



Figura 5.6 - Peneiramento das amostras na peneira n° 10 (# 2mm) e separação de conchas

A NBR 6457/86 estabelece que a preparação da amostra para ensaios de caracterização granulométrica pode ser com secagem prévia ao ar até próximo da umidade higroscópica e sem secagem prévia, conhecida como de via úmida. A norma enfatiza ainda que a segunda opção pode ser empregada apenas no caso da amostra apresentar, no máximo, 10% de materiais retidos na peneira n° 40 (0,42 mm), caso comum em sedimentos lagunares. A USEPA (2001) recomenda via úmida para os sedimentos de dragagem por não proporcionar a consolidação proveniente da secagem, evitando a dificuldade de destorroamento que induz a obtenção de granulometrias maiores que a de campo. Aliado a esses fatos, experiências laboratoriais (Santos, 2001) demonstram que solos orgânicos com alta umidade tendem a expandir e dificultam a leitura de sedimentação no densímetro.

Portanto, os materiais que passaram na peneira n° 10 foram expostos em bandejas com 20 kg cada e secos ao ar até atingirem umidade próxima a 100 %, sendo considerado via úmida, por estar distante da umidade higroscópica.

Este processo foi monitorado por balanças e por termohigrômetro digital programado para registro das temperaturas diárias máximas e mínimas. Durante o período de 29 dias observou-se um decaimento da umidade de valores próximos a 250% para 100%, cuja curva de decaimento se observa no gráfico da Figura 5.7 e a consistência é percebida no registro fotográfico da Figura 5.8.

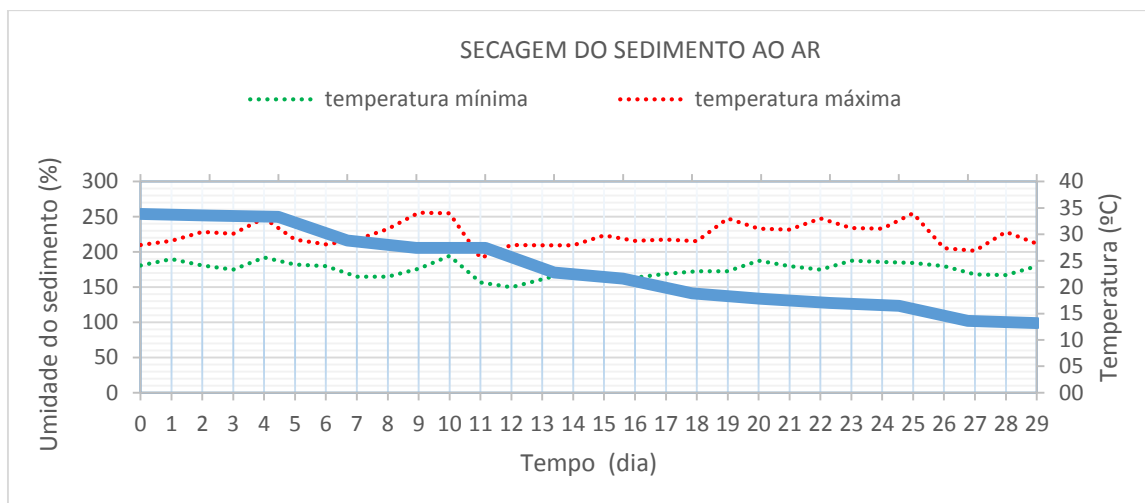


Figura 5.7 – Gráfico de decaimento médio da umidade na secagem ao ar, com registro da temperatura ambiente para preparo de amostra do ensaio granulométrico via úmida.



Figura 5.8 – Decaimento da umidade do sedimento durante o período de secagem ao ar

Após destorroado com almofariz e mão de gral, esse material passou novamente na peneira nº 10 e se retirou cerca de 70g equivalente a material seco para a sedimentação com defloculante (hexametáfosfato de sódio), conforme os procedimentos indicados na NBR 7181/84.

Embora diferentes escalas granulométricas aritméticas sejam utilizadas para definir as frações de composição do solo, como a adotada pela ASTM, pela AASHTO e pelo MIT, o presente estudo utilizou a escala da ABNT indicada na NBR 6502/1995 e, quando possível, fez correlação com a escala logarítmica denominada de escala phi (Φ) ou escala *Wentworth* indicada na resolução nº 454/12 do CONAMA.

Outras características do material que vão interferir no comportamento geotécnico, tais como o coeficiente de não uniformidade (C_{nu})³¹ e o coeficiente de

³¹ Coeficiente de não uniformidade: muito uniforme ($C_{nu} \leq 5$), uniformidade média ($5 < C_{nu} \leq 15$) e não uniforme ($C_{nu} > 15$)

curvatura (C_c)³², foram calculados a partir dos diâmetros abaixo do qual se situam 10% (D_{10}), 30% (D_{30}), e 60% (D_{60}) das partículas, conforme equações 5.3 e 5.4 apresentadas em Pinto (2006).

$$C_{nu} = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad 5.3$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad 5.4$$

5.2.4. Limites de Atterberg

Ensaio para obtenção do limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e limite de contração do solo (LC) foram realizados com base nas respectivas normas da ABNT: NBR 6459/84, NBR 7180/84 e 7183/82.

A partir dos resultados desses limites ocorreu a determinação de índices, tais como: Índice de plasticidade ($IP = LL-LP$) que indica a quantidade máxima de água adicionada a um solo para que ele mantenha sua consistência plástica³³, o Índice de Atividade ($IA = IP/\text{Fração argila}$) que indica o quanto a argila é ativa³⁴ e o Índice de Consistência ($IC = (LL-W) / (LL-LP)$) utilizado para indicar a consistência do solo saturado³⁵.

5.2.5. Classificação do sedimento

Classificar um solo é incluí-lo em um determinado grupo com características e propriedades geotécnicas similares. Dentre os sistemas de classificação dos solos encontram-se os baseados apenas na distribuição granulométrica das partículas e aqueles

³² Coeficiente de Curvatura: descontínuo (graduação aberta) ($C_c \leq 1$), bem graduado ($1 < C_c \leq 3$) e mal graduado (graduação uniforme) ($C_c > 3$).

³³ Índice de Plasticidade: Fracamente plástica ($1 < IP < 7$), medianamente plástica ($7 < IP < 15$) e altamente plástica ($IP > 15$)

³⁴ Índice de Atividade: Argila inativa ($IA < 0,75$), Argila normal ($0,75 \leq IA \leq 1,25$) e Argila ativa ($IA > 1,25$) – Critério de Skempton.

³⁵ Índice de consistência de argilas saturadas: mole ($IC < 0,5$), média ($0,5 < IC < 0,75$), rija ($0,75 < IC < 1$) e dura ($IC > 1$).

que também consideram outras características de comportamento do solo, como os limites de Atterberg (Almeida, 2005).

Com base apenas na distribuição granulométrica existem os que nomeiam o solo a partir da fração dominante e subdominante e os que utilizam diagramas triangulares, como o diagrama de FERET geralmente utilizados para fins agrícolas.

Dos sistemas de classificação que incluem as características da fração mais ativa do comportamento do solo, especialmente recomendados para solos com mais de 30% de finos, tem-se: o sistema AASHO (HRB e TBR), onde o solo é classificado de A1 a A7 e desenvolvido principalmente para classificar subleito, base e sub-base de rodovias; O Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), normatizado pela ASTM em 1983 e que classifica o solo em 15 subgrupos identificados por um conjunto de duas letras; e o Sistema MCT (Mini Classificação Tropical) que utiliza como parâmetros os resultados do ensaio mini-CBR, esforços de penetração, expansão e contração, permeabilidade e outros que com a granulometria classificam o solo em 7 grupos divididos nas classes dos lateríticos e não lateríticos.

Este trabalho optou por classificar o material de dragagem pelo tradicional Sistema Unificado de Classificação do Solo (SUCS).

5.2.6. Caracterização mineralógica

O estudo da mineralogia colabora significativamente para a classificação dos solos, pois possibilita a discriminação dos minerais presentes e conseqüente o melhor entendimento do comportamento físico químico do material. Neste sentido, técnicas de Difração de Raio-X (DRX) e Fluorescência de Raio-X (FRX) foram utilizadas.

A Difração de Raio-X permite a identificação dos argilominerais presentes, que segundo Mitchell (1993), é quem controla as características superficiais da partícula, assim como o seu tamanho, forma, resistência, expansibilidade e plasticidade.

O método de DRX utilizado para determinação de estruturas cristalinas foi realizado com amostra em pó (< 75µm- fração fina) enviadas em tubos de eppendorfs para o Laboratório de multi-usuário de análise por DRX no Instituto de Química/UFRJ. O procedimento compreendeu a compactação do material em um leito com cerca de 1

mm de espessura sobre um pequeno suporte, sendo submetido ao feixe do difratômetro de raio X na faixa coberta com ângulo (2θ) variando de 2° a 45° . A interpretação do difratograma para identificação dos argilominerais foi realizado com auxílio do programa DIFFRAC.EVA V3.1 orientado pela equipe do Instituto Federal do Espírito Santo.

A Fluorescência de Raio-X é uma técnica analítica que permite identificar a composição química da amostra através da excitação dos elementos constituinte por um feixe primário proveniente de um tubo de raio-x. Esse feixe pode remover elétrons das camadas eletrônicas mais internas e promover a reorganização por meio de deslocamento de elétrons das camadas externas para as mais internas. Nesse processo é emitida a radiação fluorescente cuja intensidade é proporcional à concentração do elemento presente na amostra, sendo possível identificá-lo.

A análise por espectrometria por fluorescência de Raio-X (FRX) foi realizada no Núcleo de Catálise (Nucat) do Programa de Engenharia Química da COPPE/UFRJ para identificação dos elementos presentes na amostra de sedimento. As amostras passaram pela peneira de $75\mu\text{m}$ (#200) foram prensadas em formato de pastilhas e conduzidas para medida no aparelho da Rigaku, modelo RIX3100, equipado com tubo de ródio (Rh) (Figura 5.9).



Figura 5.9 – Equipamento de moldagem das pastilhas e Espectrômetro por fluorescência de Raio-X, marca Rigaku, modelo RIX3100.

Para complementar o reconhecimento dos sedimentos, a técnica da microscopia eletrônica de varredura (MEV) permitiu uma observação das amostras ampliadas em muitas vezes com boa resolução de imagens. Essa técnica acoplada ao analisador de energia dispersiva (EDS) contribuiu na identificação da constituição química do mineral.

Para realização deste ensaio as amostras foram fixadas sobre o porta amostra metálico onde foram metalizadas com uma fina camada de ouro de forma a torná-las condutoras e então dispostas no equipamento da marca Zeiss DSM 960 (Figura 5.10). As análises ocorreram no laboratório do Instituto Federal do Espírito Santo.



Figura 5.10 – Equipamento de metalização da amostra e Microscópio Eletrônico de Varredura

5.2.7. Teor de Matéria Orgânica (TMO)

Dentre as diversas formas de determinação do teor de matéria orgânica encontram-se os métodos químicos de oxidação com soluções como o dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) cujo procedimento é definido no manual da EMBRAPA (1997) e os métodos térmicos de calcinação em mufla com temperaturas que variam de 250 °C a 550 °C, tais como os procedimentos indicados na ABNT NBR 13.600/96 (440 °C) e NBR 10.664/89 (550 °C).

Neste estudo foram utilizados dois métodos distintos. O método térmico com mufla a 440°C conforme norma NBR 13600/96 e o método químico com oxidação da matéria orgânica (via úmida) pelo dicromato de potássio em meio sulfúrico e o sulfato de prata como catalizador.

Nesse método químico, após a oxidação, o excesso de dicromato é titulado com solução de sulfato ferroso amoniacal, utilizando-se para tal a difenilamina como indicador. Neste procedimento a percentagem de matéria orgânica é calculada multiplicando-se o resultado do carbono orgânico por um fator igual a 1,724. Este fator é utilizado em virtude de se admitir que na composição média do húmus, o carbono participa com 58 % (EMBRAPA, 1997).

Amostras preparadas para a caracterização granulométrica são utilizadas para o método térmico, enquanto que para o método químico deve-se destorroá-las em gral para se obter o material passante na peneira de 180 micrometros (#80).

Ensaio foram realizados em duplicatas e nos dois métodos utilizou-se o sedimento natural e o sedimento lavado com uso de acetona e centrífuga para retirada de salinidade. Seis ciclos de lavagem foram realizados até detecção satisfatória com sulfato de prata. Na Figura 5.11 observa-se equipamentos e procedimentos utilizados para determinação da matéria orgânica e de lavagem do solo para retirada de salinidade.

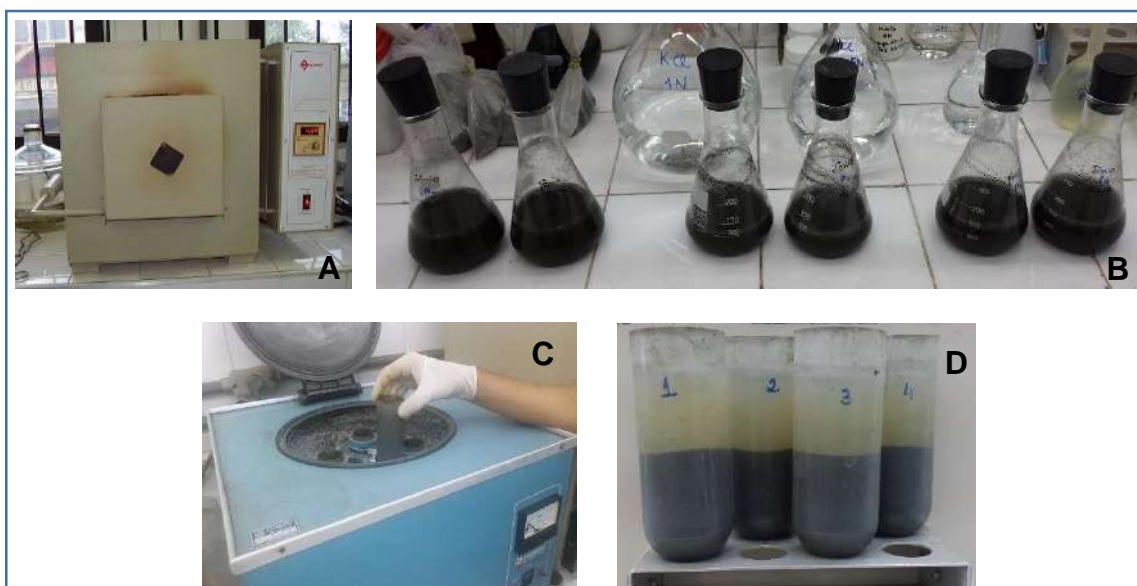


Figura 5.11 - Equipamentos e processos de determinação da matéria orgânica do sedimento. A) mufla para queima da M.O; B) preparo das amostras para método do dicromato; C) centrífuga para separação da solução de lavagem do sedimento; D) tubetes com segregação do sedimento do fluido.

5.2.8. Resistência ao cisalhamento

Schnaid & Odebrecht (2012), ao indicarem métodos para medição da resistência ao cisalhamento, especificam que para solo com características de granulometria finas e argilosas a medição da resistência ao cisalhamento não drenado (S_u) é o método mais apropriado e indicam o ensaio de palheta (“Vane Shear test”) pela alta aplicabilidade.

Esse ensaio de palheta consiste na rotação de uma paleta cruciforme em profundidade previamente determinada, conforme procedimento da norma da ABNT NBR 10905/89 que estabelece a equação 5.5 para o cálculo da resistência ao cisalhamento não drenado (S_u), em função do torque máximo medido (T) em kNm e o diâmetro da palheta (D) em metros.

$$S_u = \frac{0,86T}{\pi D^3} \quad 5.5$$

Os ensaios de mini palheta foram realizados em duplicata nas tortas retidas nos sistemas geotêxtil fechado em tempos próximos de 10, 20, 30 e 40 dias de secagem após o último ciclo de enchimento, em ponto de profundidade média da torta e diagonalmente opostos, conforme visualiza-se na Figura 5.12. O equipamento de mini palheta do Laboratório de Geotecnia da Coppe-UFRJ foi utilizado com constante de mola de 0,017 kgf.cm, palheta com diâmetro de 1,27 cm e altura de 2,54 cm, e velocidade de rotação de 6 graus/minuto (0,0167 rpm). Esses ensaios foram efetuados para se verificar o ganho de S_u com a evolução da perda de umidade do solo (torta retida) com o tempo.

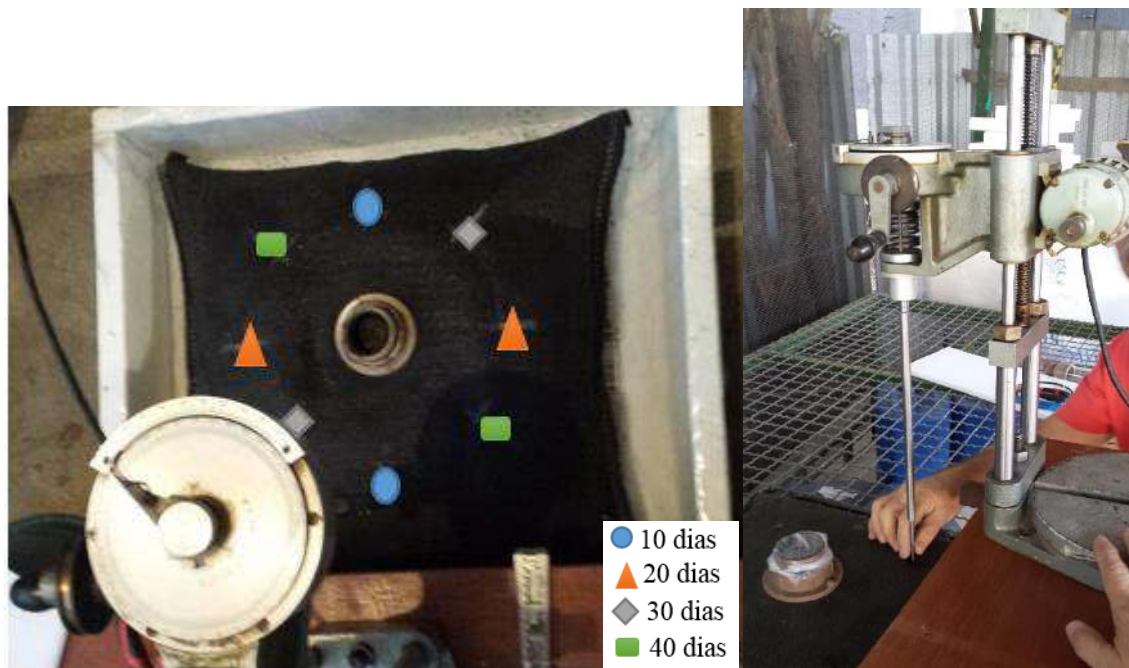


Figura 5.12 – Identificação de pontos de amostragem no sistema geotêxtil fechado e Detalhe do equipamento de mini palheta.

5.2.9. Parâmetros da compressão oedométrica

O adensamento é a redução progressiva ao longo do tempo do volume de uma massa de solo em consequência da diminuição do volume de vazios devido à expulsão de água, causada por efeito do peso próprio ou acréscimo de tensão externa. Acrescenta-se que esse fenômeno pode ser dividido em: a) Inicial - redução relativamente rápida do volume, também chamado de recalque imediato; b) Primário - redução progressiva do volume devido, principalmente, a expulsão do água dos vazios de solo, transferindo a pressão suportada para o esqueleto sólido; c) e Secundário - redução progressiva do volume devido aos efeitos viscosos que ocorrem na estrutura interna da massa de solo depois de ocorrido o adensamento primário.

O ensaio de compressão oedométrica ou ensaio de adensamento lateralmente confinado tem procedimento definido pela ABNT NBR 12.007/90 que indica corpos de prova cilíndricos dispostos entre pedras porosas de forma saturada e submetidos a carregamentos sucessivos, correspondentes a 1,5, 3,125, 6,25, 12,5, 25, 50, 100, 200 e 400 kPa e descarregamentos também sequenciados até 25 kPa. Durante as etapas de alteração da carga foram feitas leituras das deformações, por meio do extensômetro, aos 6 s, 15 s, 30 s, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h e 4 h de carregamento e no descarregamento após 24h.

Os corpos de prova cilíndricos com 7,15 cm de diâmetro e 3,0 cm de altura foram obtidos pela cravação de anel metálico nas tortas de sedimentos retidos após 40 dias do último ciclo de enchimento dos sistemas geotêxteis fechados (SGF) 01, 04, 06 e 07. Enquanto que corpos de prova de mesmo diâmetro e altura de 2,0 cm foram obtidos do SGF 05, 08 e 09.

O anel metálico utilizado para obtenção do corpo de prova e as prensas de adensamento do tipo Bishop do Laboratório de Geotecnia da Coppe-UFRJ, utilizados na pesquisa, são ilustrados na Figura 5.13.



Figura 5.13 – Cravação de anel cilíndrico para obtenção do corpo de prova e Prensas de adensamento do tipo Bishop do laboratório de geotecnia da Coppe-UFRJ

Dos corpos de prova utilizados para os ensaios de compressão oedométrica foram determinados o índice de vazios inicial (e_0) e o grau de saturação inicial (S_0) por meio das equações 5.6, 5.7 e 5.8.

$$e_0 = \left(\frac{h}{h_s} \right) - 1 \quad 5.6$$

$$h_s = \frac{M_s}{\rho_s \cdot A} \quad 5.7$$

$$S_0 = \frac{w_d \cdot G_s}{e_0} \quad 5.8$$

Onde:

e_0 : índice de vazios inicial

h : altura inicial do corpo de prova no anel (3 ou 2 cm)

h_s : altura aparente inicial do material seco no anel (cm)

M_s = massa seca da amostra (g)

ρ_s : massa específica real dos grãos (g/cm^3)

G_s : densidade relativa dos grãos

A : área do anel (cm^2)

S_0 : Saturação inicial (%)

w_d : umidade gravimétrica da amostra (%)

A curva traçada com a leitura no extensômetro (ordenadas) e a respectiva raiz quadrada dos tempos de medição em minutos indicados no procedimento do ensaio (abscissas) permite determinar, pelo método de Taylor³⁶, o coeficiente de adensamento (C_v) para cada carregamento e descarregamento a partir da equação 5.9 e equação 5.10.

$$C_v = \frac{0,848(0,5H_{50})^2}{t_{90}} \quad 5.9$$

$$H_{50} = H_0 - \frac{5}{9}(H_0 - H_{90}) \quad 5.10$$

Onde:

C_v : Coeficiente de adensamento vertical (m^2/s)

t_{90} : tempo correspondente a 90% do adensamento primário (s);

H_{50} : altura da amostra que corresponde a 50% do adensamento primário (cm);

H_0 : altura inicial da amostra, ajuste (cm);

H_{90} : altura da amostra correspondente a 90% do adensamento primário (cm).

Vale destacar que a altura do corpo de prova (H) modifica com o processo de adensamento e equivale a altura inicial do corpo de prova no anel (h) menos a deformação ocorrida em cada etapa de carregamento ou descarregamento, seja após 24 h ou em um tempo relativo a certo percentual do adensamento. Essa deformação corresponde a diferença da leitura inicial e final no extensômetro, que possui constante escalar de 0,001

³⁶ O método de Taylor permite o ajuste da curva teórica à curva experimental e consiste em traçar uma reta tangente ao trecho inicial, onde a interseção com o eixo das ordenadas indica a altura do corpo de prova no início do adensamento (H_0) e a diferença entre esse ponto e a altura do corpo de prova antes do carregamento indica a compressão inicial. Do ponto de altura do corpo de prova no início do adensamento primário, traça-se uma nova reta até o ponto de 1,15 vezes a abscissa da primeira reta. A interseção desta nova reta com a curva do ensaio indica o ponto em que teria ocorrido 90% do adensamento e assim permite-se a definição do tempo para ocorrer 90% do adensamento (t_{90}) e a altura correspondente do corpo de prova (H_{90}) (MASSAD, 2016).

cm. Por sua vez, a deformação específica vertical (E_v) representa o percentual de deformação em relação à altura inicial do corpo de prova no anel.

Da mesma forma que determina-se o índice de vazios inicial pode-se determinar o índice de vazio final, considerando a altura do corpo de prova após 24h de cada alteração da carga que provocou as diferentes tensões vertical efetiva definidas no procedimento normatizado.

A elaboração do gráfico de índice de vazios (e) x tensão vertical efetiva (σ'_v) em escala logarítmica permite a determinação da tensão de pré-adensamento (σ'_{vm}) pelo método de Pacheco e Silva³⁷. Deste gráfico é definido também os índices de compressão (C_c) e de descompressão ou expansão (C_e) (equação 5.11), sendo o primeiro verificado no trecho de compressão virgem do solo e o segundo no trecho de descompressão.

$$C_c \text{ ou } C_e = \left(\frac{-\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v} \right) \quad 5.11$$

Onde:

C_c : índice de compressão (m^2/kN)

C_e : índice de descompressão ou expansão (m^2/kN)

Δe : Variação do índice de vazios

$\Delta \log \sigma'_v$: variação logarítmica da tensão efetiva vertical (kPa)

Caso o gráfico seja plotado em função do índice de vazios (e) pela tensão vertical efetiva (σ'_v) em escala aritmética pode-se determinar o coeficiente de compressibilidade (a_v) (equações 5.12). Acrescenta-se que quando a plotagem do gráfico ocorrer em função da deformação volumétrica específica (ΔE_v) pela tensão vertical efetiva ($\Delta \sigma'_v$) em escala aritmética, pode-se determinar o coeficiente de compressibilidade volumétrica (m_v) (equações 5.13) e o módulo oedométrico (E_{oed}) (Equação 5.14).

$$a_v = \left(\frac{\Delta e}{\Delta \sigma'_v} \right) \quad 5.12$$

$$m_v = \left(\frac{\Delta E_v}{\Delta \sigma'_v} \right) = \left(\frac{a_v}{1 + e_0} \right) = \left(\frac{1}{E_{oed}} \right) \quad 5.13$$

³⁷ No método de Pacheco e Silva prolonga-se o trecho de inclinação da reta virgem até que este toque uma reta horizontal correspondente ao índice de vazios inicial. Neste ponto de interseção, passa-se uma reta vertical até atingir a curva de compressão do solo, de onde uma horizontal segue até atingir a o prolongamento do trecho de compressão virgem realizado inicialmente. Esse ponto atingido equivale a tensão de pré-adensamento (σ'_{vm}) (MASSAD, 2016).

$$E_{\text{oed}} = \left(\frac{\Delta\sigma'_v}{\Delta E_v} \right) \quad 5.14$$

Onde:

a_v : coeficiente de compressibilidade (m^2/kN)

Δe : Variação do índice de vazios

$\Delta\sigma'_v$: Variação da tensão efetiva vertical (kPa)

m_v : coeficiente de compressibilidade volumétrica (m^2/kN)

ΔE_v : Variação da deformação vertical específica (%)

e_0 : índice de vazios inicial

E_{oed} : módulo oedométrico (kPa)

A partir dos dados gerados no ensaio de compressão oedométrica é possível determinar o coeficiente de permeabilidade (k) por meio da equação 5.15 e o recalque total por adensamento primário (ΔH) com a equação 5.16.

$$k = C_v \left(\frac{a_v}{1+e_0} \right) \gamma_w = C_v \cdot m_v \cdot \gamma_w \quad 5.15$$

$$\Delta H = H_0 \cdot m_v \cdot \Delta\sigma'_v \quad 5.16$$

Onde:

k : coeficiente de permeabilidade (m/s)

C_v : Coeficiente de adensamento (m^2/s)

a_v : coeficiente de compressibilidade (m^2/kN)

e_0 : índice de vazios inicial

m_v : coeficiente de compressibilidade volumétrica (m^2/kN)

γ_w : peso específico da água

ΔH : Variação da altura do corpo de prova (cm)

H_0 : altura inicial da amostra, ajustada (cm)

$\Delta\sigma'_v$: Variação da tensão efetiva vertical (kPa)

5.3. PARÂMETROS AMBIENTAIS E MÉTODOS ANALÍTICOS

5.3.1. Capacidade de Troca Catiônica (CTC)

A Capacidade de Troca Catiônica do solo é definida como sendo a soma total dos cátions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Al^{3+} , H^+) que os colóides de cargas negativas, predominante na superfície dos solos, atraem e os retêm. Os cátions tornam-se disponíveis à assimilação pelas plantas, devido a troca com íons de H^+ resultantes da atividade biológica das raízes e micro-organismos³⁸.

Portanto, a CTC total pode ser entendida como a capacidade máxima de carga negativa do solo, de onde os cátions fixados só se liberam pela troca por outro cátion de mesma carga.

Estes cátions adsorvidos são removidos por extração sucessiva com soluções de cloreto de potássio (KCl), ácido clorídrico (HCl), acetato de cálcio ($\text{Ca}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$) e acetato de amônio ($\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}_2$) e posteriormente determinados por métodos volumétricos e espectrometria de absorção atômica (Figura 5.14), conforme procedimento definido no manual da Embrapa (1997). Esses ensaios foram realizados no laboratório de química da geotecnia-UFRJ e na Embrapa solos-RJ.

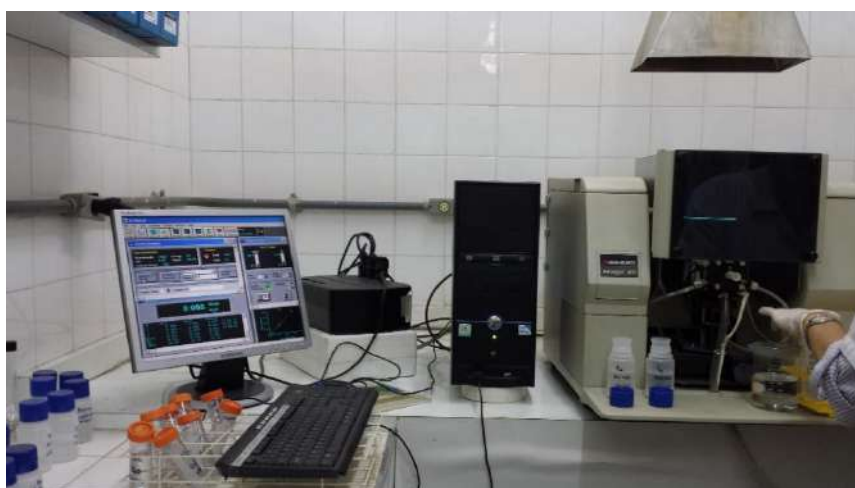


Figura 5.14 – Espectrômetro de absorção atômica com chama Perkin-Elmer Modelo AAnalyst 300 do laboratório de química da geotecnia-UFRJ

³⁸ A unidade de centimol de carga (cmolc) representa a quantidade necessária de cátion (nutriente) deslocado por 10,08 mg de H^+ . Conversão de unidades: $1 \text{ cmol}_c/\text{kg} = 1 \text{ meq}/100\text{g} = 10\text{mmol}_c/\text{kg}$.

5.3.2. Potencial Hidrogeniônico (pH)

A medição do pH no sedimento seguiu os procedimentos definidos pelo manual da Embrapa. A medida foi efetuada por meio de potenciômetro (Analion/M-606F) com eletrodo de vidro combinado (Analion/V-620) imerso diretamente nos líquidos provenientes da suspensão solo:líquido na proporção 1:2,5. Utilizou-se água e KCl (1N) como líquidos da suspensão. Quando o material já se encontra em estado líquido a medição é realizada diretamente com a leitura no potenciômetro, conforme APHA-SMEWW método 9045-C.

5.3.3. Potencial Redox (Eh)

O potencial redox, potencial de oxidação/redução ou ORP (*Oxidation Reduction Potential*) é uma medida da tendência de espécies de adquirir ou doar elétrons. Quando mais positivo, maior indício de espécies oxidadas com tendência a receber elétrons. As condições com valores mais negativos favorecem a existência de espécies reduzidas propícias a doarem elétrons. Em geral, solos óxidos apresentam valores de Eh na faixa de +300 a +800mV enquanto solos anóxicos podem exibir Eh variando de -414 a 118mV (Yong, 1992 apud Castiglia, 2006).

A medida do potencial de oxirredução (Eh) foi realizada por meio do potenciômetro (Analion/M-606F ou Orion/M-720A) com eletrodo de platina (Analion/ROX674), conforme APHA- SMEWW método 2580-B.

5.3.4. Condutividade elétrica específica (CEE)

A condutividade representa a capacidade que uma solução aquosa tem para transportar uma corrente elétrica e depende principalmente da presença e concentração de íons, sua mobilidade e valência (USEPA, 2001).

A verificação da condutividade elétrica específica do sedimento foi realizada na solução extraída por meio de funil de buchner, kitasato e bomba a vácuo, conforme manual da Embrapa. Quando o material já se encontra em estado líquido a verificação da CEE é realizada diretamente com a medida no condutímetro (OAKTON/PC300) com medição em mS/cm, conforme APHA- SMEWW Método 2510-B.

A condutividade elétrica específica é um método indireto recomendado para se determinar a salinidade. Para tanto, efetua-se a calibração do condutivímetro com medições de condutividade em soluções de água deionizada com concentrações conhecidas de cloreto de sódio (NaCl), obtendo-se a curva CEE (mS/cm) x concentração de NaCl (‰) da Figura 5.15.

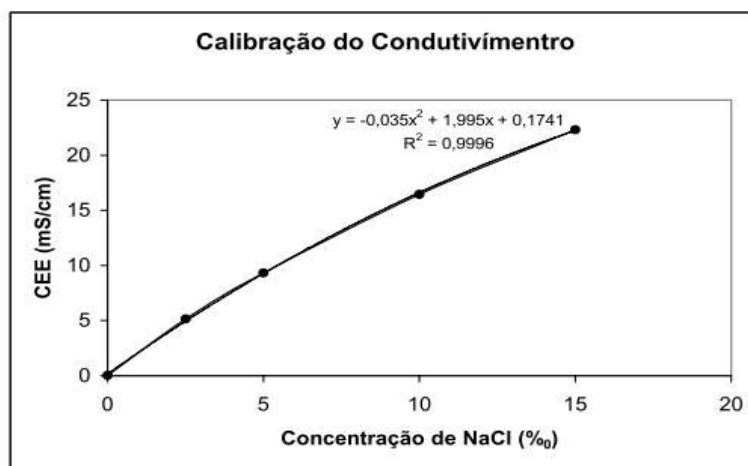


Figura 5.15 - Curva de calibração do condutivímetro (Castiglia, 2006)

5.3.5. Carbono Orgânico Total (COT)

O teor de carbono é um indicador da presença de matéria orgânica na amostra. O ideal é obter o carbono orgânico a partir da subtração dos valores medidos para carbono total e carbono inorgânico. Quando isso não é possível, converte-se o carbono orgânico da amostra em dióxido de carbono (CO₂) por métodos de combustão catalítica ou oxidação química. O CO₂ formado é então medido em analisador carbonáceo.

Dentre os métodos analíticos de combustão e oxidação, tem-se: a combustão a alta temperatura (APHA SMEWW método 5310B), oxidação com persulfato (APHA SMEWW método 5310C) e oxidação úmida (APHA SMEWW método 5310D). Esses procedimentos também são abordados pela EPA no método 9060A.

O presente trabalho seguiu os procedimentos do método 5310B, que se baseia na combustão da amostra³⁹ a alta temperatura com avaliação em detector infravermelho (Shimadzu/5000-A) da quantidade de carbono total no CO₂ produzido. Em seguida a

³⁹ Amostras líquidas são filtradas em membrana de celulose com diâmetro de poro igual a 0,45µm para obtenção do carbono orgânico dissolvido.

amostra é acidulada com ácido fosfórico e o CO₂ liberado é conduzido ao mesmo detector infravermelho para quantificação da parcela relativa ao carbono inorgânico. A quantidade de carbono orgânico total é obtida por meio da diferença entre os dois valores encontrados. Essas análises foram realizadas no Laboratório de Engenharia Sanitária (LES) da UERJ com complementos na empresa Innolab para amostras de sedimento.

5.3.6. Série Nitrogenada

As determinações das espécies de nitrogênio podem ser subdivididas em dois grupos. O primeiro grupo representa as formas reduzidas: nitrogênio orgânico (medido por uma digestão química prévia dos compostos nitrogenados, que são convertidos em amônia) e nitrogênio amoniacal (medido por destilação da amônia e titulação). O Nitrogênio Kjeldahl total (NTK) é a soma do nitrogênio orgânico e o nitrogênio amoniacal, ou seja, mede-se pelo conjunto de digestão, destilação e titulação. O segundo grupo refere-se as formas oxidadas: nitrito e nitrato (medido através de colorimetria).

Essas formas de nitrogênio podem ser associadas as etapas de degradação da poluição orgânica conforme se verifica na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Formas de Nitrogênio associadas as etapas de degradação orgânica

Área de depuração natural	Composto predominante	Formas
Zona de degradação	Nitrogênio orgânico	Reduzida
Zona de decomposição ativa	Nitrogênio amoniacal	
Zona de recuperação	Nitrito	Oxidada
Zona de águas limpas	Nitrato	

No procedimento analítico, o nitrogênio da amostra, que está praticamente ligado a matéria orgânica, é convertido em sulfato de amônio ((NH₄)₂SO₄) através de oxidação com uma mistura ácida de sulfatos (CuSO₄, H₂SO₄ e Na₂SO₄ ou K₂SO₄). Em seguida, no meio alcalino, o sulfato de amônio libera a amônia que é complexada na solução de ácido bórico (H₃BO₃) e determinado por acidimetria, conforme previsto no procedimento da Embrapa através do método Kjeldahl e na APHA SMEWW método 4500-C.

Além da determinação do Nitrogênio Kjeldahl total, os métodos para a determinação do nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato seguiram os procedimentos APHA SMEWW métodos 4500N-F, B e E, respectivamente e foram realizados no Laboratório

de Engenharia do Meio Ambiente (LEMA) da UFRJ com complementos na empresa Innolab especialmente para as amostras de sedimento.

5.3.7. Fósforo Total

O elemento químico Fósforo ocorre na natureza de forma quase exclusivamente como fosfatos (PO_4). Estes são classificados como ortofosfatos, fosfatos condensados e fosfatos organicamente ligados.

O teste de Fósforo Total mede aquelas formas de fosfato que são convertidas para ortofosfatos durante oxidação por digestão ácida. Isto inclui muitas formas de fosfatos organicamente ligados e condensados. Uma vez convertidos para ortofosfatos, a reação com molibdato em solução ácida produz ácido fosfomolibdico, que é reduzido pelo ácido ascórbico a um complexo azul. A intensidade da cor gerada é relacionada ao teor de fosfatos na amostra inicial e medidas efetuadas em espectrofotômetro.

Neste trabalho a digestão ácida de amostras líquidas foi realizada com solução oxidante de persulfato de potássio e medida em espectrofotômetro no comprimento de onda de 880 nm, conforme procedimento APHA SMEWW método 4500P-B5. Para amostras de sedimento a digestão foi com ácido sulfúrico e leitura em espectrofotômetro no comprimento de onda de 660 nm de acordo com procedimento APHA SMEWW método 4500P-E, similar ao indicado no manual da Embrapa. As análises de amostras líquidas foram realizadas no Laboratório de Engenharia do Meio Ambiente (LEMA)-UFRJ com complementos na empresa Innolab especialmente para as amostras de sedimentos.

5.3.8. Oxigênio Dissolvido (OD)

Oxigênio dissolvido é a concentração de oxigênio (O_2) contido na água, sendo essencial para todos os seres aquáticos aeróbios. Esse parâmetro foi medido em campo pelo método eletrométrico utilizando o oxímetro de equipamento multiparâmetros.

5.3.9. Temperatura

A variação da temperatura pode interferir em diversos processos bioquímicos e sua medição foi realizada diretamente por meio de equipamento multiparâmetros.

5.3.10. Turbidez

A turbidez das águas é devida à presença de partículas em estado coloidal, em suspensão, de natureza orgânica ou inorgânica e outros organismos microscópicos. Esse parâmetro representa o grau de interferência da passagem da luz através da amostra líquida.

O procedimento de medição da turbidez é baseado na comparação da intensidade da luz espalhada pela amostra em condições definidas, com a intensidade da luz espalhada por uma suspensão de padrão referência. Quanto maior a intensidade da luz espalhada, maior será a turbidez da amostra.

No método nefelométrico a leitura é feita em turbidímetro e expressa em unidades nefelométricas de turbidez (NTU), cuja turbidez máxima medida é de 40 NTU. No método FAU a leitura é realizada através de espectrofotômetro Hach e expressa em unidades de atenuação da formazina (FAU), cuja turbidez máxima medida é de 450 FAU. Alcances de medidas maiores são obtidos quando considerados fatores de diluição e a correlação entre os métodos, quando necessária, seguiu a equação 5.17 definida por Veról et al. (2005).

$$\text{FAU} = 1,5454 \text{ NTU} + 12,712 \quad 5.17$$

A determinação da turbidez das amostras foi realizada no campo, por meio de turbidímetro portátil Orbeco-Hellige, modelo 966-R1 e no Laboratório de Engenharia do Meio Ambiente (LEMA) da UFRJ, por meio do espectrofotômetro Hach, modelo DR/2010, conforme o procedimento APHA SMEWW método 2130B e método Hach 8237, respectivamente.

5.3.11. Sólidos Totais e Teor de Sólidos

Os sólidos totais presentes no líquido são aqueles que ficam como resíduo após evaporação e secagem entre 103°C a 105°C até peso constante, cujo procedimento analítico utilizado neste estudo seguiu a APHA SMEWW método 2540 B.

Esse sólido é classificado em dissolvido, coloidal e suspenso⁴⁰ conforme o tamanho das partículas (Figura 5.16). A determinação dos sólidos dissolvidos na água seguiu o procedimento da APHA SMEWW método 2540 C.

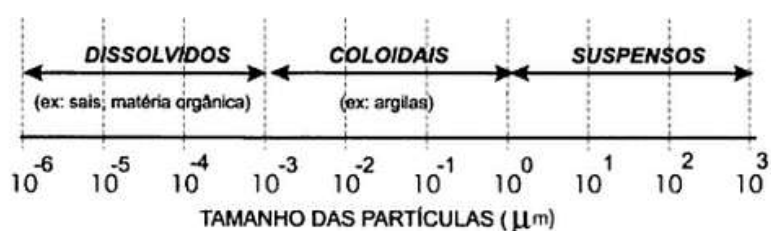


Figura 5.16 – Classificação e distribuição dos sólidos em função do tamanho das partículas (Von Sperling, 2005)

Na lama de dragagem, a parcela de sólido totais costuma ser expressa em porcentagem e pode ser representada em peso (mais comum) ou em volume. A ABNT NBR 10.664/89, também utilizada neste estudo, descreve um método modificado para lodo e sedimento, capaz de determinar o teor de sólido em peso (TSp) em função do peso seco (P_s) e o peso total (P_t) de uma amostra, conforme a equação 5.19.

$$\text{TSp} = \left(\frac{P_s}{P_t} \right) \times 100 \quad 5.18$$

A norma apresenta ainda uma relação com teor de umidade sobre a base úmida (w_w), expressa na equação 5.19.

$$w_w = 1 - \text{TSp} \quad 5.19$$

⁴⁰ Os sólidos suspensos ($\varnothing > 1,2 \mu\text{m}$) que se dividem em sólidos sedimentáveis, sendo definido como a quantidade que sedimenta por gravidade em cone Inhoff de um litro após uma hora (Von Sperling, 2005).

Para se trabalhar com o teor de sólido em volume (TSv) foi necessário conhecer a densidade relativa dos grãos (Gs), a densidade da lama (ρ), a densidade da água ($\rho_{\text{água}}$) e efetuar o cálculo por meio das equações 5.20 ou 5.2, indicadas por Vertematti (2015).

$$TSv = \frac{TSp \times \rho}{Gs} \quad 5.20$$

$$TSv = \frac{[(\rho - \rho_{\text{água}}) \times 100]}{Gs - \rho_{\text{água}}} \quad 5.21$$

Uma relação entre volume total (V) em m³, massa seca (Ms) em kg, densidade da lama/lodo (ρ) adimensional, massa específica da água ($\gamma_{\text{água}}$) em kg/m³ e teor de sólidos (TSp) em % foi apresentada por Jordão & Pessôa (2013) por meio da equação 5.22.

$$V = \frac{Ms}{TSp \times \rho \times \gamma_{\text{água}}} \quad 5.22$$

5.3.12. Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

A Demanda Bioquímica de Oxigênio corresponde à quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica por processos biológicos. Se a DBO for elevada, será preciso grandes taxas de Oxigênio Dissolvido para oxidá-la e não restará oxigênio suficiente para a vida aquática aeróbica.

O procedimento analítico deste parâmetro compreende a medição da quantidade de oxigênio molecular usado durante um período de incubação especificado para degradar bioquimicamente o material orgânico e para oxidar formas reduzidas de nitrogênio presentes no líquido (USEPA, 2001). Neste estudo utilizou-se o procedimento APHA SMEWW método 5210-B e os ensaios nas amostras líquidas foram realizados no Laboratório de Engenharia do Meio Ambiente (LEMA) da UFRJ.

5.3.13. Demanda Química de Oxigênio (DQO)

Sabe-se que a Demanda Química de Oxigênio representa a quantidade de oxigênio consumido em meio ácido forte com temperatura elevada e pH reduzido, que leva à degradação de matéria orgânica. É evidente que nas condições da verificação da DQO

não só substâncias orgânicas são oxidadas, mas também outras, como sulfetos, sulfitos, nitritos, etc. A DQO representa quase um limite superior da possibilidade de estabilização total de um efluente, devido a degradação química forçada da matéria orgânica.

Neste estudo a quantificação da DQO foi realizada em triplicata e o procedimento consistiu na adição de solução digestora (ácido crômico) e solução ácida (ácido sulfúrico) nas amostras líquidas, que após conduzidas ao digestor com alta temperatura durante 2 horas, tiveram as medidas de DQO realizadas no espectrofotômetro (HACH/DR 2010) com comprimento de onda de 600 nm (método Hach 8000) ou por titulação com sulfato ferroso amoniacal do excesso do dicromato de potássio (método padrão Refluxo Aberto). Essas análises foram realizadas no Laboratório de Engenharia do Meio Ambiente (LEMA) da UFRJ.

5.3.14. Metais Traço

O termo metal traço está relacionado a baixa concentração em que são detectados os metais⁴¹ no meio, com teor em torno de parte por milhão em massa (mg/kg) ou menor. Essa definição engloba metais e metaloides (Hooda, 2010).

Os metais traço presentes nos sedimentos são classificados como os residuais, que se encontram na estrutura cristalina dos minerais, e os não-residuais, incorporados aos sedimentos por processos de adsorção, precipitação e complexação com substâncias orgânicas e inorgânicas. Os não-residuais são característicos de fontes antrópicas e considerados potencialmente móveis (biodisponíveis) conforme as condições de oxidação, redução e acidez do ambiente.

Vários procedimentos analíticos para medir metais traço em amostras de sedimentos têm sido reportados na literatura como: a digestão total, extrações sequenciais e digestão parcial. Nesses procedimentos são utilizadas diferentes misturas ácidas no

⁴¹ Dentre os metais, encontram-se os metais pesados definidos como um grupo de elementos reativos e bioacumulativos situados entre o cobre e o chumbo na tabela periódica devido aos seus pesos atômicos e cujas densidades encontram-se superiores a 4,0 g/cm³.

processo de solubilização dos metais traço, que posteriormente são quantificados por espectrometria de emissão ou absorção atômicas.

O procedimento de digestão total de maneira geral envolve a mistura dos ácidos nítricos, clorídrico e fluorídrico (HNO_3 ; HCl e HF), capazes de solubilizar os elementos químicos associados a todas as frações geoquímicas, ou seja, as frações trocáveis, carbonáticas, oxidáveis, reduzidas e residual indicadas na Tabela 5.7. Esse procedimento é regulamentado pela EPA SW846 método USEPA 3052.

A digestão seletiva ou sequencial permite a determinação de cada uma das cinco frações numa mesma amostra. O método consiste na aplicação sequencial de reagentes, em geral ácidos fracos, agentes redutores, agentes complexantes, agentes oxidantes e ácidos fortes. Domingues (2009) relata que a sequência de aplicação dos reagentes não é procedimento padrão, podendo diferir em função do método adotado. O método proposto por Tessier et al. (1979) tem sido empregado na geotecnia ambiental e compreende a extração de metais nas frações e extratores indicados na Tabela 5.7.

Tabela 5.6 – Fração de metais nos sedimentos e principais extratores pelo método de Tessier (elaborado a partir de Domingues, 2009)

Fração de metais	Metais extraídos	Extrator principal
Fração trocáveis	metais ligados por troca catiônica aos argilominerais e compostos orgânicos.	Cloreto de magnésio (MgCl_2)
Fração carbonáticas	metais associados aos minerais carbonáticos	Acetato de sódio (CH_3COONa ou NaOAc) + ácido acético (HOAc)
Fração redutível	metais associados aos óxidos e hidróxidos de Fe e Mn	Hidroxilamina (H_2NO) + ácido acético (HOAc)
Fração oxidável	metais associados aos sulfetos e matéria orgânica	Ácido nítrico (HNO_3) + peróxido de hidrogênio (30% H_2O_2) + acetato de amônio (NH_4OAc)
Fração residual	metais incorporados aos retículos cristalinos dos minerais	Ácido nítrico (HNO_3) + ácido perclórico (HClO_4) + HF

A método de digestão parcial com ácido clorídrico (HCl 0,1M e 0,5M) mostra-se eficiente para a extração de metais das frações trocáveis e facilmente disponíveis. No entanto, a mistura do ácido clorídrico e nítrico (HCl ; HNO_3) apresenta poder oxidante distintos e é capaz de promover a liberação dos metais de todas as frações móveis, que podem se tornar biodisponíveis.

Aguiar et al. (2007) estimam que a digestão parcial com água régia ($3\text{HNO}_3:1\text{HCl}$) 50% retira todo o metal associado a fração trocável, bem como os ligados à matéria orgânica, aos óxidos de ferro e de manganês e aos minerais carbonáticos. Inclusive

remove aqueles associados ao alumínio, ferro e manganês amorfos. Portanto, mantém apenas a fração residual, referente ao metal associado à estrutura mineralógica litogênica, que por sua vez não se caracteriza como contaminação antrópica.

A digestão parcial recomendada pela resolução nº 454/12 do CONAMA indica EPA SW846 método USEPA 3050B, que utiliza a água régia com peróxido ($\text{HNO}_3 + \text{HCl} + \text{H}_2\text{O}_2$) para digestão do metal traço e o método 3051A, que promove a digestão da amostra com água régia ($\text{HNO}_3 + \text{HCl}$) sob alta temperatura e pressão em forno de micro-ondas, reduzindo tempo e perda de elementos voláteis. Esse último método foi empregado neste estudo para verificação do Chumbo, Cobre, Níquel, Zinco e Ferro.

Na digestão das amostras empregou-se o forno de micro-ondas da marca Berghof, modelo speedwave four (Eningen, Alemanha) (Figura 5.17) e os frascos de digestão de politetrafluoroetileno modificado, modelo DAP-60+ com controle individual de temperatura e pressão com limite de 60 bar. Após resfriamento, o volume dos extratos foi completado a 25 ml com água ultra pura obtida de um sistema Milli-Q®, modelo Direct 8 (Merck Millipore, Billerica, Massachusetts, EUA) e a mistura foi então centrifugada.

Os sobrenadantes foram direcionados à determinação dos analitos pela técnica de Espectrometria de Emissão Óptica com Fonte de Plasma Indutivamente Acoplado (ICP OES), sequencial, com visão radial, marca Horiba Jobin Yvon, modelo Ultima 2 (Longjumeau, França) (Figura 5.17), equipado com câmara de nebulização ciclônica, nebulizador do tipo MiraMist, amostrador automático modelo AS 421 e software operacional Analyst 5.4 para aquisição dos dados.



Figura 5.17 – Forno de micro-ondas da marca Berghof e Espectrômetro de Emissão Óptica com Fonte de Plasma Indutivamente Acoplado (ICP OES) da marca Horiba Jobin Yvon

A quantificação foi realizada por interpolação utilizando curva analítica com cinco soluções-padrão para a calibração⁴², seguindo o procedimento EPA SW846 método 6010D. Essas determinações foram realizadas no Laboratório de Desenvolvimento Analítico (LaDA) do Instituto de Química-UFRJ com complementos na empresa Innolab especialmente para as amostras de sedimentos.

5.4. MATERIAL GEOTÊXTIL UTILIZADO

O material geotêxtil utilizado no presente estudo foi fornecido pela empresa Huesker, e se caracteriza como um geotêxtil tecido constituído de polipropileno de alta tenacidade, ultra estabilizado anti-UV, cuja principal função é realizar a retenção de partículas sólidas de forma provisória ou permanente reduzindo impactos ambientais.

A partir de diferentes tecidos (HaTe 25/25 UV, HaTe 35/35 UV, HaTe 45/45 UV, HaTe 55/55 UV, HaTe 80/80UV e HaTe 105/105 DW) a empresa confecciona geoformas, nomeado pelo fabricante como SoilTain DW.

Este trabalho utilizou discos com diâmetro de 35 cm e mini-bolsas quadradas com lado de 53 cm confeccionados com o material HaTe 105/105 DW cujas propriedades seguem na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Propriedades do tecido geotêxtil utilizado no experimento

Propriedades e norma de avaliação	HaTe 105/105 DW
Gramatura (ISO 9864)	440 g/m ²
Resistência à tração nominal (ISO 10.319)	105 kN/m
Deformação na resistência nominal (ISO 10.319)	≤10,0 %
Permeabilidade (ISO 11058)	≥20 x 10 ⁻³ m/s (tol. ±2 x 10 ⁻³)
Abertura de filtração (ISO 12956)	≥240 μm (tol. ± 40)

⁴² As soluções de Cu, Fe, Ni, Pb e Zn foram geradas a partir de diluição de solução-padrão estoque SpecSol de concentração 1.000 ou 10.000 mg/l até obtenção das concentrações desejadas utilizando assemelhamento de matriz e água ultra pura obtida de um sistema Milli-Q®, modelo Direct 8.

5.5. PARÂMETROS DE ANÁLISES DO SEDIMENTO E DA ÁGUA

As amostras de sedimento e água coletadas na lagoa da Tijuca foram analisadas com base em parâmetros geotécnicos e ambientais. Esses parâmetros foram determinados em função das diretrizes do CONAMA na resolução nº 454/12 (gerenciamento de sedimento dragado) e resolução nº 357/05 (classificação de corpos d'água), bem como as constatações de trabalhos acadêmicos (Fernandes, 1991; Borma, 1998; Lerner, 2000; Castíglia, 2006; Cypriano, 2009; Benedetti, 2011) sobre o tema (ANEXO 5).

Portanto, os parâmetros definidos para caracterizar o sedimento compreenderam a granulometria, densidade real dos grãos, limites de Atterberg, teor de matéria orgânica, carbono orgânico total, Nitrogênio Kjeldahl total, fosforo total, metais traço (Cobre, Chumbo, Níquel, Ferro e Zinco), capacidade de troca catiônica, teor de umidade, condutividade elétrica específica, potencial Hidrogeniônico, potencial redox e outros constantes na Tabela 5.8, cujos procedimentos analíticos e laboratórios foram apresentados.

Tabela 5.8 – Parâmetros e métodos analíticos de caracterização do sedimento

Parâmetros	Métodos analíticos
Granulometria	NBR 7181/84, via úmida com defloculante
Limites de Atterberg	NBR 6459/84 (Liquidez)
	NBR 7180/84 (Plasticidade)
	NBR 7183/84 (Contração)
Teor de umidade	NBR 6457/86
Teor de sólidos em peso	NBR 10.664/89 - método para lodo e sedimento
Densidade real dos grãos	NBR 6508/84 (γ_s)
Peso específico natural	NBR 9813/87 (γ_n) – adaptado
Peso específico aparente	Calculado
Teor de Matéria Orgânica	Embrapa – Dicromato de potássio NBR 13.600/96 (440 °C)
Nutrientes:	
- Carbono orgânico total (COT)	APHA SMEWW 5310-C (MA-026-L2)
- Nitrogênio Kjeldahl total	APHA SMEWW 4500-C (MA-024-L2)
- Fósforo total	APHA SMEWW 4500P- E (MA-031-L2)
Contaminantes inorgânicos:	
Metais Traço: Pb, Cu, Ni, Zn e Fe	EPA SW846 método 3051A e 6010D (MA-070-L2)
Potencial de hidrogênio (pH)	Embrapa – pH (água e KCl) APHA SMEWW método 9045-C
Potencial Redox (Eh)	APHA SMEWW método 2580-B
Capacidade de Troca Catiônica (CTC)	Embrapa - soma dos cátions trocáveis
Condutividade elétrica específica (CEE)	Embrapa – sais solúveis
Característica mineralógica	FRX
	DRX

Na caracterização da água proveniente da lagoa os parâmetros utilizados compreenderam a turbidez, sólidos totais (suspensos e dissolvidos), condutividade elétrica específica, potencial Hidrogeniônico, Carbono orgânico total, Fósforo total, Demanda Bioquímica de oxigênio, Demanda Química de oxigênio, Oxigênio dissolvido, metais traço (Cobre, Chumbo, Níquel, Ferro e Zinco) e outros constantes na Tabela 5.9, cujos procedimentos analíticos foram apresentados.

Tabela 5.9 – Parâmetros e métodos analíticos de caracterização da água

Parâmetros	Métodos analíticos
Sólidos totais (Suspensos e Dissolvidos)	APHA SMEWW Método 2540-B e C
Turbidez	Método Hach 8237 APHA SMEWW método 2130-B
Contaminantes inorgânicos:	
Elementos traço - Metais: Pb, Cu, Ni, Zn	EPA SW846 método 3051A e 6010D (MA-070-L2)
Potencial de hidrogênio (pH)	APHA SMEWW método 9045-C
Potencial redox (Eh)	APHA SMEWW método 2580-B
Oxigênio Dissolvido (OD)	Método eletrométrico
Condutividade elétrica específica (CEE)	APHA SMEWW método 2510-B
Nutrientes:	
- Carbono orgânico total (COT)	APHA SMEWW 5310-C (MA-026-L2)
- Nitrogênio Kjeldahl total (NTK)	APHA SMEWW 4500-C (MA-024-L2)
- Nitrogênio amoniacal total	APHA SMEWW 4500-F
- Nitrito	APHA SMEWW 4500-B
- Nitrato	APHA SMEWW 4500-E
- Fósforo total (P-total)	APHA SMEWW 4500P-B.5
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	APHA SMEWW Método 5210-B
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	Método Hach 8000 e método refluxo aberto

5.6. CRITÉRIOS DE PREPARO DA LAMA DE DRAGAGEM

5.6.1. Forma de preparo da lama

A USEPA (1994) relata que a dragagem hidráulica opera succionando lama (sedimento + água) com teor de sólido em peso (TSp) entre 10 a 20% e que teores inferiores podem ser comuns para a dragagem que opera com uma menor taxa de produção visando reduzir a ressuspensão em casos de dragagens ambientais.

Para a produção da mistura de sedimento e água em laboratório, simulando a lama proveniente de uma dragagem, considerou-se inicialmente a umidade gravimétrica (w_d) definida em triplicata para cada amostra do sedimento que houvera sido colocada em sacolas plásticas e bombonas no momento da homogeneização e armazenamento em câmara úmida.

Diante do teor de umidade (w_d) e da massa úmida (Mu) da amostra de sedimento a ser utilizada, foi possível identificar a massa seca (Ms) (equação 5.23).

$$M_s = \frac{Mu}{1 + \left(\frac{w_d}{100}\right)} \quad 5.23$$

De posse da massa seca do sedimento (Ms) obteve-se a massa de água a adicionar (Maa) afim de obter o teor de sólido em peso desejado (TSp) (equação 5.24).

$$M_{aa} = \left(\frac{M_s}{\frac{TSp}{100}}\right) - Mu \quad 5.24$$

A mistura (água e sedimento) foi realizada à medida que se necessitava de lama para ensaios. Após preparada a lama, efetuava-se em duplicata a conferência do teor de sólido em peso com secagem de amostras de lama na estufa de 60°C e também a verificação da densidade da lama com picnômetros de 25 ml.

5.6.2. Preceitos reológicos da lama

A reologia é o estudo do escoamento e deformação da matéria quando submetida a uma tensão sob determinadas condições térmica durante um período. A propriedade que descreve a resistência ao escoamento de um fluido, proporcionada pelo atrito das camadas internas, chama-se viscosidade (Freire, 2012; Dolabella, 2017).

Quando o material não escoar, sua deformação é tida como reversível ou elástica, obedecendo a lei de Hooke. Quando há escoamento, os fluidos podem ser classificados em newtonianos e não newtonianos.

No caso de fluido newtoniano, a viscosidade dinâmica ou absoluta (μ), expressa em Pa.s, é constante e obtida através da razão direta linear entre a tensão de cisalhamento

(τ) e a taxa de deformação ao cisalhamento ($\dot{\gamma}$)⁴³. Essa viscosidade única somente é influenciada pela temperatura e pressão.

Nos fluidos não newtonianos tem-se uma viscosidade aparente (μ_a) pois a relação entre a tensão de cisalhamento (τ) e a taxa de deformação ($\dot{\gamma}$) não é constante nem com escoamento laminar a temperatura e pressão constante. Esses fluidos não newtonianos podem ser classificados em viscoelásticos, dependentes e independentes do tempo de aplicação da tensão de cisalhamento.

A variação da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação é mostrada em reograma, ou seja, representação gráfica da curva de fluxo, cuja equação matemática pode ser representada por vários modelos empíricos existentes na literatura para diferentes tipos de material e identificados Figura 5.18.

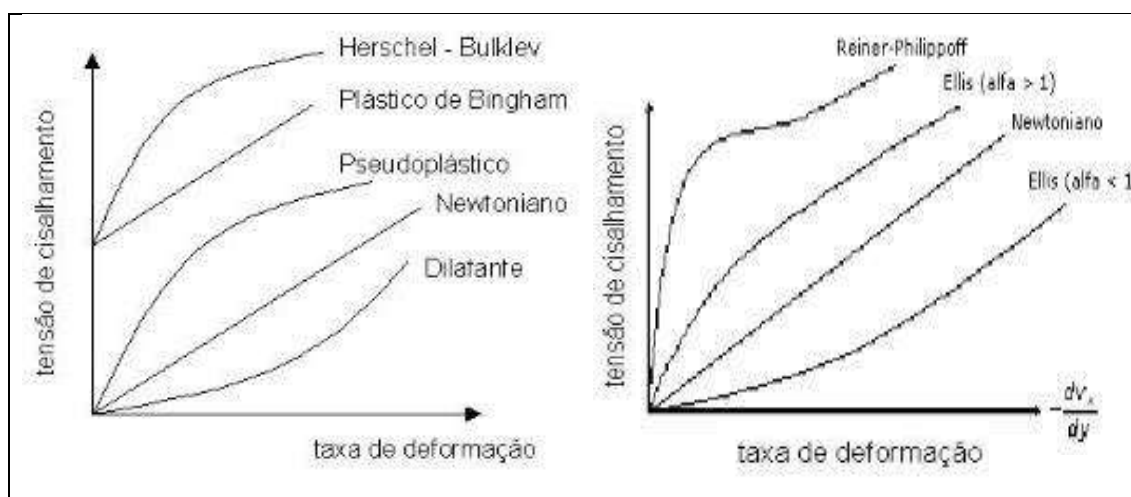


Figura 5.18 – Curvas de fluxo de fluidos newtoniano e não newtonianos (Machado, 2002)

Em estudos hidráulicos costuma-se utilizar o conceito de viscosidade cinemática (ν) definida a partir da divisão direta entre a viscosidade (μ ou μ_a) e a densidade do fluido (ρ), sendo comumente expressa em m^2/s ou cm^2/s .

⁴³ A taxa de deformação ao cisalhamento, denominada de taxa de deformação, taxa de cisalhamento ou gradiente de velocidade, representa o deslocamento relativo das partículas ou moléculas do fluido e sua unidade mais comum é s^{-1} .

5.6.2.1. Ensaio de viscosidade da lama

As viscosidades das lamas de dragagem com diferentes concentrações de sólidos foram investigadas em duplicata no Laboratório de Interação Rocha-Fluido/GTEP da PUC-RIO por meio do viscosímetro fann 35, que consiste em um viscosímetro rotacional com cilindros coaxiais tipo couette, no qual o cilindro externo gira a uma velocidade definida, provocando um escoamento na amostra do material fluido entre os dois cilindros.

A resistência viscosa exercida pelo fluido no interior do cilindro cria um torque no cilindro interno, denominado *Bob*. Este torque é transmitido a uma mola, onde sua deflexão é medida e relacionada as constantes do instrumento e condições de teste.

O procedimento do ensaio é estabelecido pela Norma PETROBRAS N-2605 (1998) e consiste na medida do ângulo de deflexão (Θ) para velocidade de rotação do cilindro (N) de 600, 300, 200, 100, 6 e 3 rpm. Assim, a tensão de cisalhamento (τ) e a taxa de deformação ($\dot{\gamma}$) podem ser obtidas considerando equações especificadas para o aparelho e as condições do teste, conforme discorrido por Shiroma (2012) (ANEXO 6). Da mesma forma, as propriedades de viscosidade aparente (μ_a), viscosidade plástica (μ_p), limite de escoamento (τ_L), índice de fluxo (n) e índice de consistência (k), também são definidas

O presente estudo analisou a viscosidade de 04 (quatro) tipos de lama de dragagem produzidas com amostras compostas da estação de coleta 13 com teores de sólidos em peso de 5%, 10%, 10% com polímero e 15%.

5.6.3. Testes para condicionamento da lama

A lama de dragagem consiste em um sistema bifásico (sólido-líquido), no qual as partículas sólidas encontram-se em movimento contínuo e desordenado (movimento browniano) que permite o contato com atração de moléculas dissolvidas ($<10^{-3} \mu\text{m}$) devido à força de Van der Waals e com repulsão de partículas coloidais (10^{-3} a $10^0 \mu\text{m}$) devido a força eletrostática da dupla camada (compacta e difusa).

Nem todas as argilas apresentam dimensões estritamente coloidais, entretanto segundo Fontes, Camargo e Sposito (2001) mesmo as partículas argilosas maiores ($2\ \mu\text{m}$) possuem características do tipo coloidal especialmente com relação a dupla camada elétrica expressa no esquema da Figura 5.19.

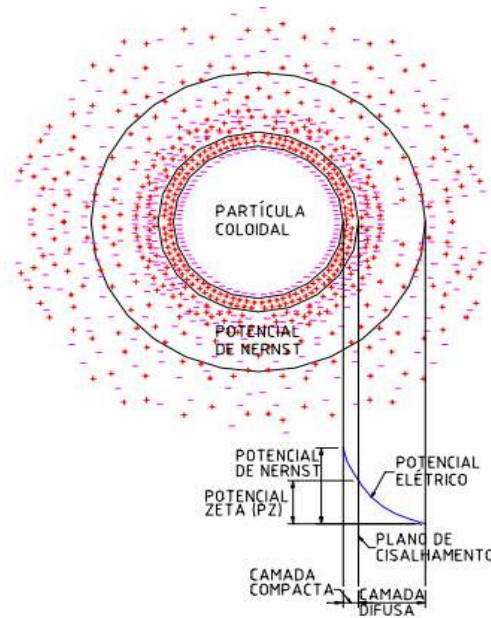


Figura 5.19 – Esquema da dupla camada elétrica em uma partícula coloidal (PAVANELLI, 2001)

Para melhorar as características de separação das fases sólido-líquida da lama dragada, efetua-se o processo de condicionamento. Esse processo permite a neutralização ou desestabilização das forças químicas ou físicas atuantes nas partes coloidais e no material particulado em suspensão da lama. Após a alteração das características elétricas da superfície dessas partículas (coagulação), elas tendem a se juntarem para formar flocos (floculação), principalmente quando estimuladas por um agito controlado. Com esse condicionamento a parte sólida prossegue com os processos de sedimentação, flotação e/ou filtração conforme o material, facilitando o desaguamento.

A neutralização ou desestabilização costumam ser efetuadas por polímeros, que podem ser naturais e sintéticos, composto por materiais orgânicos e inorgânicos⁴⁴. Esses polímeros em geral permitem a solubilidade em água e sua carga elétrica pode ser negativa (aniônica), positiva (catiônica) ou não iônica (sem carga).

⁴⁴ Em estações de tratamento de esgoto os polímeros inorgânicos mais empregados são cloreto férrico, sulfato de alumínio e policloreto de alumínio, enquanto que os de base orgânica são as poliaminas e o tanino ((RAMALHO, 2013).

Em fluido com grande quantidade de partículas finas carregadas negativamente, como os solos orgânicos e argilosos, os polímeros mais apropriados para proporcionar a floculação são os de carga oposta, ou seja, os catiônicos (MIKI, 1998).

O tipo e dosagem do polímero a utilizar no condicionamento da lama depende das características do material e da avaliação em testes de bancada. Esses testes compreenderam o teste de desaguamento rápido (TENCATE, 2010) e ensaios de mini funil (HUESKER, 2013) cujos procedimentos são padronizados por empresas especializadas em geossintéticos, e com o teste de jarro (*Jar test*) (ASTM D2035-13) que melhor define as condições dinâmicas para mistura.

5.6.3.1. Programa de ensaios de mini funil

Os ensaios foram realizados em lama de dragagem com teor de sólido em peso de 10%, pH de 6,5 (primeira etapa) e 7,5 (segunda etapa), peso específico de 1,07 g/cm³ e temperatura ambiente. Não houve necessidade de testes com varredura do pH para identificar a polimerização ideal, tendo em vista que os valores de pH da lama encontram-se dentro da faixa de 6,0 a 8,0 prevista no protocolo do ensaio de mini funil (HUESKER, 2013).

Essa lama foi preparada com a mistura de amostra composta de sedimento e água da estação 13, cujas características constam no capítulo de resultados. O geotêxtil utilizado como mini funil tem uma abertura de filtração > 240 µm com tolerância de ±40 e demais propriedades constantes na Tabela 5.7.

Os 05 (cinco) polímeros testados são constituídos por poliacrilamida catiônica, com aparência de um pó granulado branco, que com a água destilada⁴⁵ e critérios definidos na norma NTS 233 da SABESP (2006) formam soluções com as propriedades identificadas na Tabela 5.10.

⁴⁵ Para maior similaridade com o campo, os polímeros de poliacrilamida catiônica tiveram sua solução formada com água fornecida pelo sistema de abastecimento público e não com água destilada comumente utilizada em laboratório.

Tabela 5.10 – Propriedades dos polímeros testados para coagulação/floculação da lama de dragagem (Kemira, 2004)

Polímeros Superfloc	Pol-01 C-498	Pol-02 8398	Pol-03 8396	Pol-04 8394	Pol-05 8392
Carga relativa	Muito alta	Muito alta	alta	media	baixa
Peso molecular	alto	Muito alto	Muito alto	Muito alto	Muito alto
Densidade aparente (kg/l)	0,75	0,8	0,8	0,8	0,8
pH da Solução a 0,5% (25°C)	3,0 - 5,0	6,0 - 9,0	6,0 - 9,0	6,0 - 9,0	3,0 - 5,0
Viscosidade a 25°C (cp/mPa.s)					
0,1%	170	35	30	30	20
0,25%	380	160	150	120	60
0,5%	800	300	280	250	120
1,00%	2000				

O procedimento seguiu a rotina do ensaio de mini funil /cone utilizando amostras de 100 ml de lama para cada dosagem de polímero testada, efetuando o registro de tempo e do volume percolado em cada um dos testes, bem como as características desse percolado (turbidez, pH, temperatura) e da torta retida (umidade e teor de sólidos). A vazão média de desaguamento foi obtida pela razão entre o volume total percolado e o tempo final decorrido (quando o intervalo de tempo de queda entre duas gotas consecutivas for igual a 10 segundos ou imediatamente superior).

Para facilitar o monitoramento do volume percolado e o tempo de filtração fez-se uso de cone Imhoff e cronômetro. Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Meio Ambiente – LEMA da UFRJ onde utilizou-se ainda balanças e estufa de 60°C para aferição de umidade da torta, bem como equipamentos de verificação de características do percolado, tais como: espectrofotômetro Hack DR2010 para medição de turbidez e phmetro. Estrutura e elementos dos ensaios de mini funil podem ser visualizados na Figura 5.20.

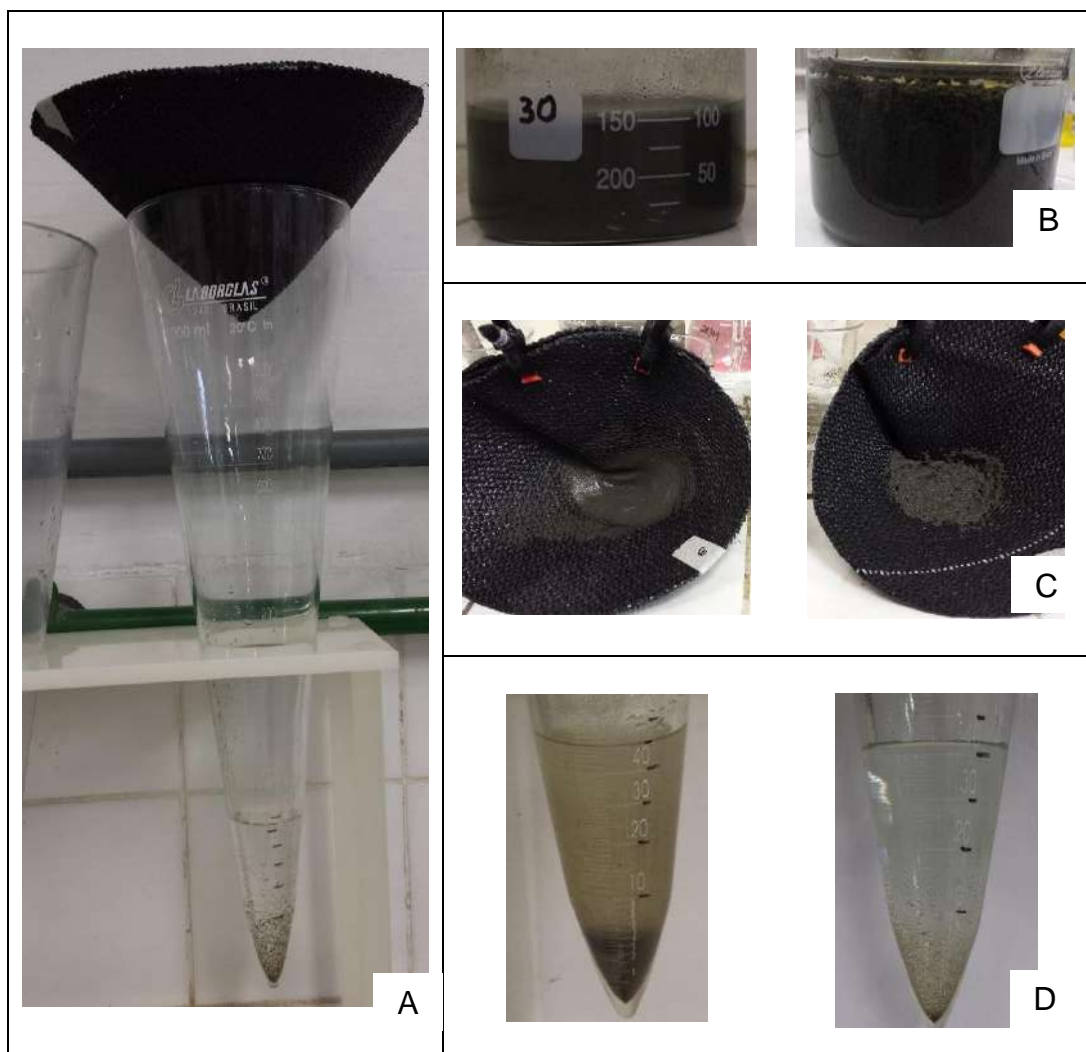


Figura 5.20- Registro fotográfico do ensaio de mini funil. A) funil geotêxtil e cone Imhof; B) Lama de dragagem natural e floculada; C) tortas retidas no funil geotêxtil; e D) percolados gerados.

Esses ensaios foram realizados em duas etapas:

1º etapa - 05 (cinco) polímeros catiônicos da empresa Kemira foram testados com solução de 0,1%, em 08 (oito) dosagens que variaram de 30 a 240 mg/l.

2º etapa - 03 (três) polímeros que apresentaram melhores resultados de turbidez na primeira etapa foram testados com solução de 1%, 0,5% e novamente 0,1%, para dosagens que variaram de 30 a 270 mg/l.

A solução do polímero, dada em percentual, representa a quantidade de gramas do polímero em pó para cada 100 ml de líquido diluidor. Como exemplo, a solução de 0,5% representa $0,5\text{g}/100\text{ml} = 5\text{ mg/ml} = 5\text{ g/l}$.

Utilizou-se a equação 5.25 de relação das soluções, para se estabelecer o volume da solução polimérica para o volume da lama em função de cada concentração de dosagem estabelecida.

$$C1 \times V1 = C2 \times V2 \quad 5.25$$

Onde:

C1 = Concentração do polímero na solução polimérica

V1 = Volume da solução polimérica

C2 = Concentração do polímero na solução de lama

V2 = Volume da solução de lama.

5.6.3.2. Programa de ensaios do *Jar test*

O refino da dosagem do polímero em função de um melhor controle do gradiente de velocidade da mistura foi realizado no *Jar test*. O procedimento do ensaio com *Jar test* segue a norma ASTM D2035-13 e consiste em encher os jarros com a lama de teor de sólidos que se quer testar e em seguida adicionar em cada jarro a solução de polímero com concentração definida e doses diferenciadas. A concentração da solução (0,5%) e as dosagens a serem testadas (120 a 240 ppm) foram definidas a partir dos ensaios de mini funil.

Após colocação das dosagens, as amostras foram agitadas por 30 segundo a 200 rpm, etapa de mistura rápida (coagulação). Na sequência, reduziu-se a velocidade de rotação para 40 rpm, mantendo o agito por mais 10 minutos, etapa de mistura lenta (floculação).

Após essas duas etapas geralmente aguarda-se a sedimentação, entretanto, na adaptação do teste, a sedimentação foi substituída pela filtração, com o transbordamento dos jarros no funis geotêxteis para se verificar tempo e volume de desaguamento, com medições de pH e turbidez do percolado, bem como a verificação das características de umidade e teor de sólido da torta retida, cujo esquema se visualiza na Figura 5.21.

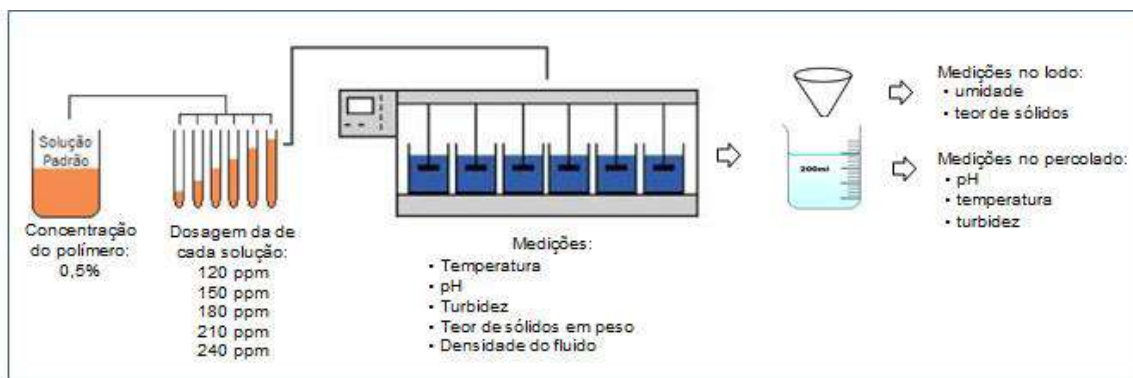


Figura 5.21- Esquema do ensaio de *Jar Test* com ensaio de mini funil (cone).

O aparelho agitador *Jar test* modelo 218 /6LDB fornece curvas de gradiente de velocidade em função da rotação dos agitadores, e contém tabela de correção da temperatura do fluido. Os dados de mistura utilizados neste experimento são apresentados na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Condições operacionais da mistura no aparelho de *Jar test*

	mistura rápida (Coagulação)	mistura lenta (Floculação)
Rotações (rpm)	200	40
Gradiente de velocidade (G) (s^{-1})	291,0	29,1
Tempo de agito (t) (s)	30	600

Na Figura 5.22 verifica-se lama natural em jarros no início do *Jar test* e após os respectivos tempos e velocidades de rotação para mistura das diferentes dosagens de polímeros, ilustra ainda aparato do ensaio de mini funil utilizado para filtração em substituição a sedimentação.

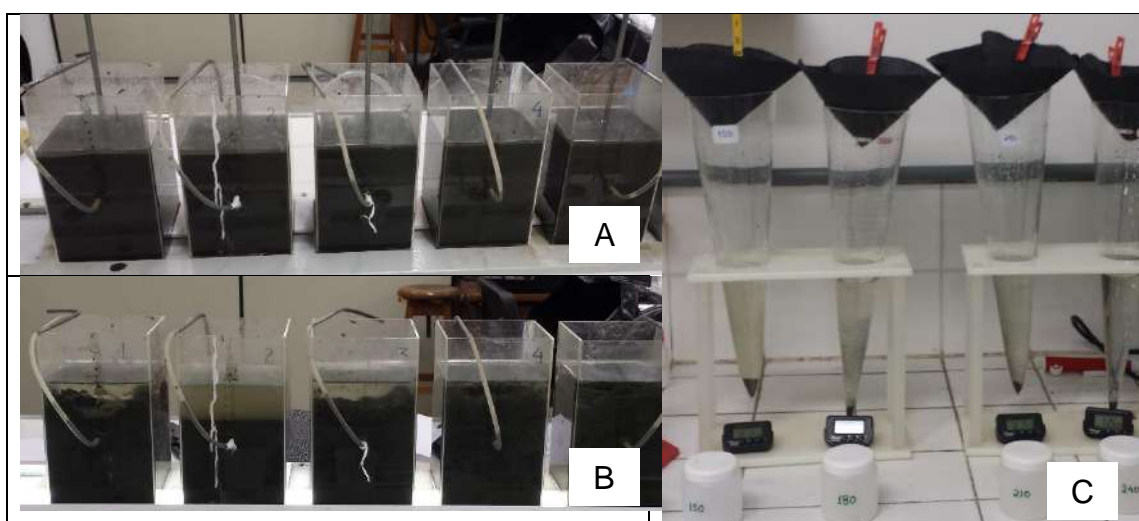


Figura 5.22 - Etapas do ensaio piloto de *Jar test* seguido pela filtração em mini funil. A) lama natural em jarros; B) lama após mistura de dosagens dos polímeros em *Jar test*; C) Aparato de filtração no mini funil (cone).

Nestes ensaios foram testados os polímeros 01 e 02 na solução de 0,5% em lama de dragagem com teor de sólido em peso de 10%, pH de 7,5, densidade de 1,07 g/cm³ e temperatura ambiente. A solução de 0,1% embora tenha mostrado uma boa performance nos ensaios de mini funil, foi descartada devido a necessidade de se utilizar uma maior quantidade de água de diluição (5 vezes mais), o que pode ser um entrave no campo.

Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Meio Ambiente (LEMA) da UFRJ com monitoramento de umidade da torta, bem como turbidez e pH do percolado, conforme metodologias analíticas apresentadas anteriormente.

5.6.3.3. Determinação da vazão de solução polimérica ao sistema

A quantidade de polímero a ser dosada na lama para promover a coagulação/floculação pode ser determinada por meio da equação 5.26 que relaciona a vazão de enchimento do sistema fechado de geotêxtil, a solução do polímero e a dosagem ótima obtida em laboratório.

$$Q_{pol} = Q \times \frac{D}{C} \quad 5.26$$

Onde:

Q_{pol}: Vazão de aplicação da solução de polímero (l/s)

Q: Vazão de enchimento do fluido (l/s);

C: concentração da solução de polímero (mg/l)

D: dosagem ótima no *Jar test* (mg/l)

5.6.4. **Elementos dimensionais para mistura da lama com polímero**

Os dimensionamentos de câmaras de misturas rápida (coagulação) e lenta (floculação) são feitos em função do gradiente de velocidade (G), definido como a diferença entre as velocidades de duas partículas separadas⁴⁶, e o período de detenção (t), ambos utilizados no ensaio de *Jar test* para determinação da dosagem ideal do polímero.

Na ausência de ensaios laboratoriais, a NBR 12216 (1992) recomenda-se que o tratamento de água utilize um gradiente de velocidade entre 700 s⁻¹ a 1100 s⁻¹ para mistura rápida de coagulantes metálicos e os demais devem seguir recomendação dos fabricantes.

⁴⁶ O gradiente de velocidade foi definido por Smoluchowski em 1917 e representa o número de oportunidades de colisões em um determinado tempo, que duas partículas experimentam, em função de uma energia externa fornecida ao sistema, o qual se encontram as partículas (FREITAS, 2001).

Di Bernardo & Dantas (2005) sugerem para mistura de polímeros catiônicos um gradiente de velocidade entre 250 s^{-1} a 800 s^{-1} com tempo de 30 a 300 s. Na mistura lenta, o gradiente de velocidade, recomendado pela NBR 12.216 (1992), deve estar compreendido entre 10 s^{-1} e 70 s^{-1} para permitir boa flocculação. Portanto os valores adotados constantes na Tabela 5.11 estão dentro do estabelecido na literatura.

Esse processo de mistura poderá ocorrer de forma mecânica ou hidráulica. No processo mecânico a mistura do fluido, em 95% dos casos, é proporcionada por rotores com hélices, turbinas, ou pás giratórias, cujas características são apresentadas na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Características do principais tipos de impelidores (MacCabe, Smith e Harriott, 1993)

Principais tipos de impelidores / agitadores	Fluxo e velocidade da mistura	Dimensões típicas
Hélices	- Fluxo axial (vertical) - velocidade de 40 a 800 rpm (grandes hélices) e 1150 a 1750 rpm (pequenas hélices)	- diâmetro menor que 50 cm independente da base do tanque de mistura
Turbinas	- Fluxo radial e tangencial - velocidades elevadas geram vórtices que podem ser impedidos por defletores	- diâmetro de 30 a 50% da base do tanque de mistura
Pás giratórias	Fluxo radial ou tangencial com quase nenhum movimento axial (vertical) - velocidade varia de 20 a 200 rpm	- pá com comprimento de 50 a 80% da base do tanque de mistura e largura de 1/6 a 1/10 do comprimento.

No processo hidráulico a mistura ocorre devido a turbulência do fluido gerada pela perda de carga acentuada que pode ser causada por ressalto hidráulico ou chicanas (MacCabe, Smith e Harriott, 1993).

5.6.4.1. Elementos dimensionais para processo mecânico de mistura

Para o dimensionamento da potência induzida ao sistema de mistura do fluido é observado a viscosidade absoluta, o volume do compartimento de mistura e o gradiente de velocidade na dosagem ótima do polímero, conforme equação 5.27 (análise dimensional) e equação 5.28 (análise experimental).

$$P = \mu \cdot V \cdot G^2 \quad 5.27$$

$$P = \frac{2\pi \cdot N \cdot \tau}{60 \cdot V} \quad 5.28$$

Onde:

P: potência introduzida no sistema (Watts);

μ : viscosidade dinâmica ou absoluta do fluido (10^{-3} Pa.s);

V: volume do compartimento de mistura (m^3);

G: gradiente de velocidade (s^{-1});

N: taxa de rotação (rps)

τ : torque (Nm), indica a relação entre a potência consumida e a velocidade de rotação.

Nunes (2001) sintetiza que a potência útil em HP dos agitadores mecânicos é calculada pela equação 5.29 e acrescenta que na prática a potência instalada deve ser acrescida de 50% de forma que o motor trabalhe a 80% da potência nominal.

$$P = \frac{\mu \cdot V \cdot G^2}{76} \quad 5.29$$

Onde:

P: potência introduzida no sistema (HP);

μ : viscosidade dinâmica ou absoluta do fluido ($kgf \cdot s/m^2$);

V: Volume do compartimento de mistura (m^3);

G: gradiente de velocidade (s^{-1});

É comum escolher o agitador mecânico e o tanque com dimensões proporcionais aos sistemas pilotos que geraram gráficos de número de Reynolds (N_{Re}) x número de potência (N_{po}) já estabelecidos na literatura, como os citados por McCabe & Smith (1993) para diferentes tipos de misturadores. Em geral, a elaboração do gráfico N_{Re} x N_{po} utiliza a equação 5.30 para calcular o número de Reynolds (N_{Re}) que identifica se o regime de escoamento é laminar ou turbulento⁴⁷.

$$N_{Re} = \frac{D^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu} \quad 5.30$$

Onde:

N_{Re} : Número de Reynolds (adimensional)

D: diâmetro do impelidor (m)

N: taxa de rotação (rps)

ρ : peso específico do fluido (kg/m^3)

μ : viscosidade dinâmica ou absoluta do fluido (10^{-3} Pa.s = $kg/m \cdot s$)

⁴⁷ Escoamentos em tanques de mistura com Número de Reynolds (N_{Re}) até 10 são considerados laminares, na faixa entre 10 e 10.000 são considerados escoamentos na zona de transição, e acima deste valor são considerados turbulentos.

O número de potência (N_{po}) representa a resistência da força de arraste das partículas, relacionando a força aplicada ao misturador e a inercial. Esse parâmetro pode ser determinado por meio de análise experimental com medidas de torque ou de forma dimensional para regime laminar (equação 5.31) ou turbulento (equação 5.32).

$$N_{po} = \frac{P}{\rho \cdot N^3 \cdot D^5} \quad 5.31$$

$$N_{po} = \frac{P}{\mu \cdot N^2 \cdot D^3} \quad 5.32$$

Onde:

N_{po} : Número de potência (adimensional)

P: Potência do agitador

μ : viscosidade dinâmica ou absoluta do fluido (10^{-3} Pa.s)

ρ : peso específico do fluido (kg/m^3).

N: taxa de rotação (rps)

D: diâmetro do impelidor (m)

Na ampliação da escala do misturador de bancada para campo, critérios como a semelhança geométrica e dinâmica devem ser observados. McCabe, Smith & Harriott (1993) indicam que o primeiro critério a observar é a semelhança geométrica entre o modelo(1) e o protótipo(2), relacionando diâmetro do misturador (D) com outros elementos como: comprimento da base do tanque de mistura (T), altura do fluido no tanque de mistura (H), distância do misturador até o fundo do tanque (H_i) e altura da lâmina do misturador (W), conforme segue na equação 5.33. Outro critério é considerar a igualdade de potência por unidade de volume e ainda a igualdade na velocidade periférica do misturador para manter a tensão de cisalhamento.

$$\left(\frac{T}{D}\right)_1 = \left(\frac{T}{D}\right)_2 : \left(\frac{H}{D}\right)_1 = \left(\frac{H}{D}\right)_2 : \left(\frac{H_i}{D}\right)_1 = \left(\frac{H_i}{D}\right)_2 : \left(\frac{W}{D}\right)_1 = \left(\frac{W}{D}\right)_2 \quad 5.33$$

A determinação do volume do compartimento de mistura (V) deve considerar os tempos de detenção (t), estabelecidos no teste de bancada da dosagem ótima do polímero (*Jar test*), e a vazão efetiva do fluido (Q). As dimensões desse tanque geralmente seguem as proporções do *Jar test* e são sugeridas por Nunes (2001) na equação 5.34.

$$V = Q \cdot t = L^2 \cdot H \quad 5.34$$

Onde:

V: Volume do tanque de mistura (m³);

Q: Vazão do fluido (m³/h ou m³/s);

t: Tempo de retenção (h ou s).

L: largura do tanque (m);

H: altura do tanque (m), definido por 1,2 vezes a largura do tanque;

5.6.4.2. Elementos dimensionais para processo hidráulico de mistura

No dimensionamento hidráulico, a mistura do fluido pode ser causada por ressalto hidráulico, chicanas verticais e horizontais e outros instrumentos que proporcionem perda de carga ao sistema. A perda de carga pode ser determinada pelas equação 5.35 citada por Nunes (2001).

$$hf = \frac{\mu \cdot t \cdot G^2}{\gamma} = \frac{\nu \cdot t \cdot G^2}{g} = n \cdot K \cdot \frac{v^2}{2g} \quad 5.35$$

Onde:

hf: perda de carga (m)

μ : viscosidade dinâmica ou absoluta do fluido (10⁻³ Pa.s);

t: tempo de detenção do fluido (s)

G: gradiente de velocidade (s⁻¹);

γ : peso específico do fluido (lama) (kg/m³)

ν : viscosidade cinemática (m²/s)

g: aceleração da gravidade, m/s²;

n: número de chicanas (mudanças de direção)

K: perda de carga localizada. (2,5 para cada mudança de direção)

v: velocidade de escoamento (m/s).

Em processos de enchimento de sistemas fechado de geotêxtil o bombeamento por tubulação é frequentemente utilizado e a perda de carga é devida:

- ao atrito do fluido com as paredes da tubulação (perda de carga distribuída);
- aos acessórios da canalização, constituídos de válvulas, curvas, retenções e outras peças que provocam variações bruscas de velocidade e direção do fluxo (perda da carga localizada).

A perda de carga distribuída ocorre ao longo da tubulação e depende de características do tubo (diâmetro, comprimento e rugosidade), de propriedades do fluido (massa específica e viscosidade) e velocidade de escoamento. Vários métodos foram desenvolvidos para determinar essa perda de carga, dentre eles Moody-Rouse, Darcy-Weisbach e Hazen-Williams (Azevedo Netto, 1998). O método de Hazen-Williams é o

mais empregado para tubulações com diâmetro igual ou maior que 50 mm, nele a perda de carga distribuída é definida pela equação 5.36.

$$hf = L \times \frac{10,641}{C^{1,85}} \times \frac{Q^{1,85}}{D^{4,87}} \quad 5.36$$

Onde:

hf: perda de carga (m)

L: comprimento da tubulação (m);

Q: Vazão (m³/s);

C: coeficiente de natureza do tubo (adimensional) – Tabelado (PVC = 130 a 140)

D: diâmetro da tubulação (m);

A perda de carga localizada, gerada pontualmente em função dos acessórios da tubulação, pode ser determinada pelo método de coeficiente de perda em função da carga cinética (equação 5.37) e pelo método do comprimento equivalente (equação 5.38).

$$hf = K \cdot \frac{v^{-2}}{2g} \quad 5.37$$

$$L_{eq} = L + \Sigma L_{eq} \quad 5.38$$

Onde:

hf: perda de carga (m)

K: constante de perda de carga (m) - Tabelado;

v: Velocidade média de escoamento (m/s);

g: aceleração da gravidade (m/s²)

L_{eq}: comprimento equivalente (m)

L: comprimento da tubulação (m);

L_{eq}: comprimento equivalente do acessório (m) – Tabelado

5.7. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL EM BOLSA DE PEQUENA DIMENSÃO – MINI SISTEMA GEOTÊXTIL FECHADO (SGF)

5.7.1. Preparação do fluido (lama) para enchimento do SGF

Em reservatório de 200 litros promove-se a preparação e condicionamento da lama. Essa etapa compreende a mistura do sedimento com a água coletada, observando as características de umidade do sedimento para se estabelecer quantidades que permitam uma lama com teor de sólido de 10% em peso e volume suficiente para enchimento do ciclo desejado.

Para o condicionamento da lama com o tipo e a quantidade de polímero definida nos testes de bancada (mini funil e *Jar test*), utilizou-se o polímero 02 em solução de 0,5% e dosagem de 180 mg/l. A mistura do fluido foi realizada de forma mecânica nos critérios definidos nos ensaios de bancada.

O volume de fluido a ser preparado na primeira etapa de enchimento do SGF foi de aproximadamente 80 litros, tendo em vista que as dimensões do SGF se encontram em conformidade com a norma ASTM D7880/D7880M que sinaliza uma faixa de 55 a 95 litros para um único ciclo constituído de enchimento e desaguamento.

A preparação do fluido ocorreu no espaço de geotecnia ambiental anexo ao prédio da geotecnia da UFRJ, onde ocorreram os experimentos com as bolsas de pequenas dimensões, denominado mini sistema geotêxtil fechado. Nesta etapa os laboratórios de caracterização de solos e o laboratório de química, ambos da geotecnia, serviram de apoio para a aferição das quantidades do sedimento, água e solução do polímero.

5.7.2. Instalação e operação do experimento em SGF

O aparato necessário para a realização deste experimento, baseou-se na norma ASTM D7880. Constitui-se basicamente de uma estrutura metálica para suporte de um tampo de mesa de PVC vazada sobre a qual apoia-se uma moldura de contenção e um estrado plástico drenante que servirá de base para a bolsa de pequena dimensão (53 cm x 53 cm) (Figura 5.23).

Essa bolsa de tecido geotêxtil, denominada mini-geoforma, possui um adaptador em PVC, no qual se conecta um tubo acrílico de 2 polegadas com 110 cm de comprimento e funil. Sob a mesa vazada, encontra-se um recipiente plástico para armazenamento de percolado. Esse recipiente é colocado sobre uma balança de piso (Figura 5.23) que possui um sistema automático de aferição e registro da massa do líquido desaguado.



Figura 5.23 – Aparato em estrutura metálica e elementos constitutivos utilizados para desaguamento em mini-SGF com enchimento manual.

Como forma de instrumentação do experimento, um trena laser acoplada a estrutura metálica efetua a medição da altura de enchimento da bolsa. Aparelhos termohigrômetros digital encontram-se programados para registro das temperaturas interna (ambiente) com diárias máximas e mínimas e de temperatura externa (líquido percolado). Cronômetros digitais são utilizados para monitorar os procedimentos de enchimento, desaguamento e coleta de amostras.

A operação do experimento com mini-SGF compreende a preparação e condicionamento da lama, enchimento do sistema, controle da pressão (carga hidráulica) e vazão de enchimento, controle constante e periódico de massa/volume desaguado e da coleta de amostras.

O enchimento do sistema ocorreu de forma manual (indicada pela norma) e bombeada (utilizada em campo), utilizando-se 09 (nove) mini-geoformas, contudo duas não foram efetivadas devido a situações comentadas nos resultados.

No caso do enchimento de forma bombeada, o tubo acrílico de enchimento foi substituído por um sistema hidráulico com mangueira cristal trançada de 2 polegadas,

conexões em PVC, selo diafragma, manômetro e conjunto moto-bomba (Figura 5.24). Neste processo a pressão de enchimento foi controlada e o sistema ficou bombeando por 1 hora cada ciclo, com novo ciclo após 24 horas ou até não haver acréscimo na massa de líquido desaguado (percolado).



Figura 5.24 – Composição do sistema bombeado de enchimento de mini-SGF

Nas duas formas de enchimento (manual ou bombeada) (Figura 5.25) o encerramento acontece após o quinto ciclo ou quando a taxa de retenção de sólidos é considerada reduzida.

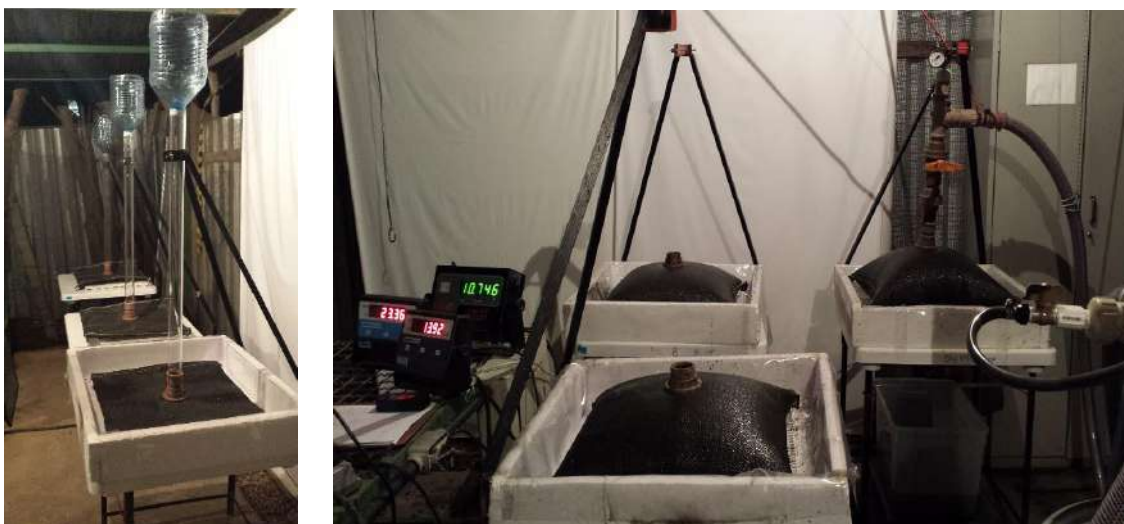


Figura 5.25 – Estrutura dos mini-SGF com enchimento manual e com enchimento bombeado

Os dados monitorados referentes as massas de entrada e saída na mini-geoforma (modelo reduzido) permitem traçar curvas de enchimento e desaguamento, bem como estabelecer correlações que, com critérios, podem vir a auxiliar numa análise de comportamento mecânico e hidráulico em escala real.

A matriz experimental no mini-SGF é apresentada na Tabela 5.13 considerando as duas formas de enchimento, a característica da lama (natural e com polímero) e com diferentes pressões de enchimento.

Tabela 5.13 - Matriz experimental

Mini-SGF	Forma de enchimento	Condicionamento da lama	Água de diluição	Pressão de enchimento (kPa)	Ciclos de enchimento	
01	Manual	Natural	1 campanha	8,0	8 ciclos	
02-F		Com polímero			0 ciclos	
03-F					5 ciclos	
04						
05						
06						
07	Bombeada	Natural	2 campanha	8,0	5 ciclos	
08		Com polímero				10,0
09						

Onde:

F – Falha no processo

5.8. MONITORAMENTO E COLETA DE DADOS DO EXPERIMENTO

5.8.1. Parâmetros de análises da mistura afluyente (lama)

Amostras de cada fluido (lama) preparado para enchimento das bolsas de pequenas dimensões foram recolhidas em recipientes plásticos e alíquotas foram distribuídas para análises da densidade, constatação do teor de sólidos, temperatura, pH, Eh, metais traço, nutrientes e outros parâmetros constantes na Tabela 5.14, cujos procedimentos foram relatados no item referente a parâmetros e métodos analíticos.

Tabela 5.14 – Parâmetros e métodos analíticos de caracterização da água

Parâmetros	Método analítico
Sólidos totais (Suspensos e Dissolvidos)	APHA SMEWW Método 2540-B e C
Turbidez	Método Hach 8237 APHA SMEWW método 2130-B
Contaminantes inorgânicos:	
Elementos traço - Metais: Pb, Cu, Ni, Zn	EPA SW846 método 3051A e 6010D (MA-070-L2)
Potencial de hidrogênio (pH)	APHA SMEWW método 9045-C
Potencial redox (Eh)	APHA SMEWW método 2580-B
Condutividade elétrica específica (CEE)	APHA SMEWW método 2510-B
Nutrientes:	
- Carbono orgânico total (COT)	APHA SMEWW 5310-C (MA-026-L2)
- Nitrogênio Kjeldahl total	APHA SMEWW 4500-C (MA-024-L2)
- Nitrogênio amoniacal total	APHA SMEWW 4500-F
- Nitrito	APHA SMEWW 4500-B
- Nitrato	APHA SMEWW 4500-E
- Fósforo total	APHA SMEWW 4500P-B.5
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	APHA SMEWW Método 5210-B
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	Método Hach 8000 e método refluxo aberto

5.8.2. Parâmetros de análises do efluente (percolado)

Durante o processo de enchimento manual do SGF, amostras do líquido proveniente do desaguamento, denominado percolado, foram coletadas com auxílio de bandejas plásticas a cada 10 cm de descida de material no tubo acrílico de abastecimento da bolsa de pequena dimensão. Antes do enchimento de novo ciclo, o efluente acumulado do ciclo anterior também era coletado.

No processo de enchimento com bombeamento do fluído (lama), a coleta de percolado foi realizada 1h, 2h e 24h após o término de cada ciclo de enchimento.

Todas essas amostras foram armazenadas em recipientes plásticos devidamente descontaminados, conduzidos para conservação na câmara frigorífica a -4°C e/ou direcionadas diretamente para análises de parâmetros físico-químicos.

Parâmetros como turbidez, pH, CEE e temperatura tiveram análises em todas as amostras de percolado coletadas (Figura 5.26). Enquanto que análises de sólidos totais (dissolvidos e suspensos), metais traço (Pb, Cu, Ni e Zn), nutrientes (Fósforo, série nitrogenada e carbono orgânico total), DBO e DQO foram realizadas apenas na amostra coletada ao final de cada ciclo (enchimento/desaguamento).

Os resultados destas análises, estatisticamente trabalhados, permitiram efetuar uma comparação com os padrões de lançamento estabelecidos pela resolução nº 430/11 do CONAMA e com características do fluido de entrada, permitindo compreender melhor o desempenho do processo de destinação de material dragado em um sistema geotêxtil fechado, bem como discutir o comportamento ambiental do processo de desaguamento com SGF.



Figura 5.26 – Aparelhos de aferição do pH, CEE, Eh e temperatura do percolado no laboratório de química da geotecnia ambiental da Coppe/UFRJ

5.8.3. Parâmetros de análises da torta retida

Durante o processo de desaguamento, especificamente nos períodos de 10, 20, 30 e 40 dias após o último ciclo de enchimento, ocorreram, em cada SGF, duas cravações estáticas de uma mini palheta de aço, com secção transversal em formato de cruz, de dimensões padronizadas, inserida até a posição desejada (metade da altura do SGF) para a execução do ensaio de Palheta (*Vane test*) e verificação da resistência não drenada do solo, cujos procedimentos foram descritos anteriormente.

Imediatamente após esse ensaio, pequenas amostras retiradas no furo foram conduzidas para determinação da umidade em triplicata. Assim, 56 ensaios de palheta foram realizados e tiveram umidades determinadas.

Após 40 dias do último ciclo de enchimento de cada um dos mini SGF, o tecido geotêxtil é cortado com estilete para abertura total da bolsa de pequena dimensão (Figura 5.27), onde amostra indeformada cilíndrica (19 x 70 mm) (Figura 5.27) é retirada para realização do ensaio de adensamento lateralmente confinado (oedométrico) e obtenção do coeficiente de adensamento (C_v), coeficiente de compressibilidade (C_c), coeficiente de expansão (C_s) e tensão de sobreadensamento (σ'_{vm}).



Figura 5.27 – Abertura da bolsa de pequena dimensão e amostra indeformada cilíndrica para ensaio oedométrico.

Nesta mesma fase, amostras deformadas da torta retida foram coletadas para determinação da umidade final, teor de sólidos, peso específico real dos grãos, limites de Atterberg, teor de matéria orgânica, carbono orgânico total, nitrogênio Kjeldahl total, Fósforo total, Metais traço (Pb, Cu, Ni, Zn), análise mineralógica e outros parâmetros constantes na Tabela 5.15, com o objetivo de comparar com as características iniciais e discutir o comportamento geotécnico e ambiental devido ao desaguamento.

Tabela 5.15 – Parâmetros e métodos analíticos de caracterização da torta retida no SGF

Parâmetros	Métodos analíticos
Granulometria	NBR 7181/84, via úmida com defloculante
Limites de Atterberg	NBR 6459/84 (Liquidez)
	NBR 7180/84 (Plasticidade)
	NBR 7183/84 (Contração)
Teor de umidade	NBR 6457/86
Teor de sólidos em peso	NBR 10.664/89 - método para lodo e sedimento
Densidade real dos grãos	NBR 6508/84 (γ_s)
Teor de Matéria Orgânica	Embrapa – Dicromato de potássio NBR 13.600/96 (440 °C)
Nutrientes:	
- Carbono orgânico total (COT)	APHA SMEWW 5310-C (MA-026-L2)
- Nitrogênio Kjeldahl total	APHA SMEWW 4500-C (MA-024-L2)
- Fósforo total	APHA SMEWW 4500P- E (MA-031-L2)
Contaminantes inorgânicos:	
Metais Traço: Pb, Cu, Zn e Fe	EPA SW846 método 3051A e 6010D (MA-070-L2)
Potencial de hidrogênio (pH)	Embrapa – pH (água e KCl) APHA SMEWW método 9045-C
Potencial Redox (Eh)	APHA SMEWW método 2580-B
Capacidade de Troca Catiônica (CTC)	Embrapa - soma dos cátions trocáveis
Condutividade elétrica específica (CEE)	Embrapa – sais solúveis
Característica mineralógica	FRX
	DRX

5.9. CONCLUSÕES PARCIAIS

A coleta e preservação das amostras de sedimento superficial e de água da lagoa da Tijuca, bem como os parâmetros de análises desses materiais formadores da lama de dragagem, tiveram os procedimentos detalhados com base em métodos analíticos consolidados descritos dessa etapa. Os processos de preparo da lama e os de determinação do tipo, dosagem e mistura ideal de polímero foram estabelecidos a partir de critérios utilizados nos protocolos de empresas especializadas em geossintéticos (RDT, mini-funil/cone) e no ensaio com Jar test.

O detalhamento das instalações e a operação dos experimentos em sistemas geotêxtil fechado seguiram preceitos da norma ASTM D7880 relativa a bolsa de pequena dimensão. O plano experimental constituído por enchimento manual e bombeado de lamas, com e sem polímero, contemplados nesta etapa metodológica que esclarece os parâmetros estabelecidos para monitoramento da lama, do percolado e da torta retida.

6. CARACTERIZAÇÕES DOS MATERIAIS CONSTITUINTES DA LAMA DE DRAGAGEM

6.1. CARACTERIZAÇÃO DO SEDIMENTO DA LAGOA DA TIJUCA

A caracterização dos sedimentos superficiais da lagoa da Tijuca (amostras da estação 12, 13, 14 e amostra mista) foi realizada conforme metodologias analíticas indicadas nos itens 5.2 e 5.4 com relação à parâmetros geotécnicos convencionais (granulometria, LL, LP, γ_n , γ_d , γ_s , G_s , w_d), nutrientes (COT, NTK, P-total), contaminantes inorgânicos (metais traço: Pb, Cu, Zn e Fe) e parâmetros complementares (CTC, pH, Eh, CEE), cujos resultados são apresentados e discutidos a seguir.

6.1.1. Parâmetros geotécnicos

A caracterização granulométrica de amostras representativas foi realizada por peneiramento e sedimentação com defloculante, seguindo os critérios de via úmida, distribuição aparente e graduação em escala aritmética da ABNT.

Solos orgânicos com alta umidade tendem a expandir e dificultam a leitura de sedimentação no densímetro. Por outro lado, a via úmida é recomendada por evitar dificuldades no destorroamento e consequente obtenção de granulometrias maiores. Para contornar essas dificuldades de leitura no densímetro e de destorroamento, as amostras denominadas P1, P2, P3 e P4 foram trabalhadas com umidades próximas de 65% (64 a 67%), cujos procedimentos foram descritos na etapa metodológica.

A Tabela 6.1 mostra as porcentagens das frações de sedimento encontradas e a Figura 6.1 apresenta as curvas granulométricas.

Tabela 6.1 - Distribuição granulométrica do sedimento superficial da Lagoa da Tijuca

Amostras compostas	Umidade de ensaio	Argila	Silte	Areia			Pedregulho	Porcentagem de finos (%)
				Fina	media	grossa		
AC - Estação 12	P3 - 65%	2	87	8	3	0	0	89
AC - Estação 13	P1 - 67%	12	77	5	6	0	0	89
AC - Estação 14	P2 - 65%	10	64	10	15	1	0	74
AC - Misto	P4 - 64%	7	80	5	8	0	0	87

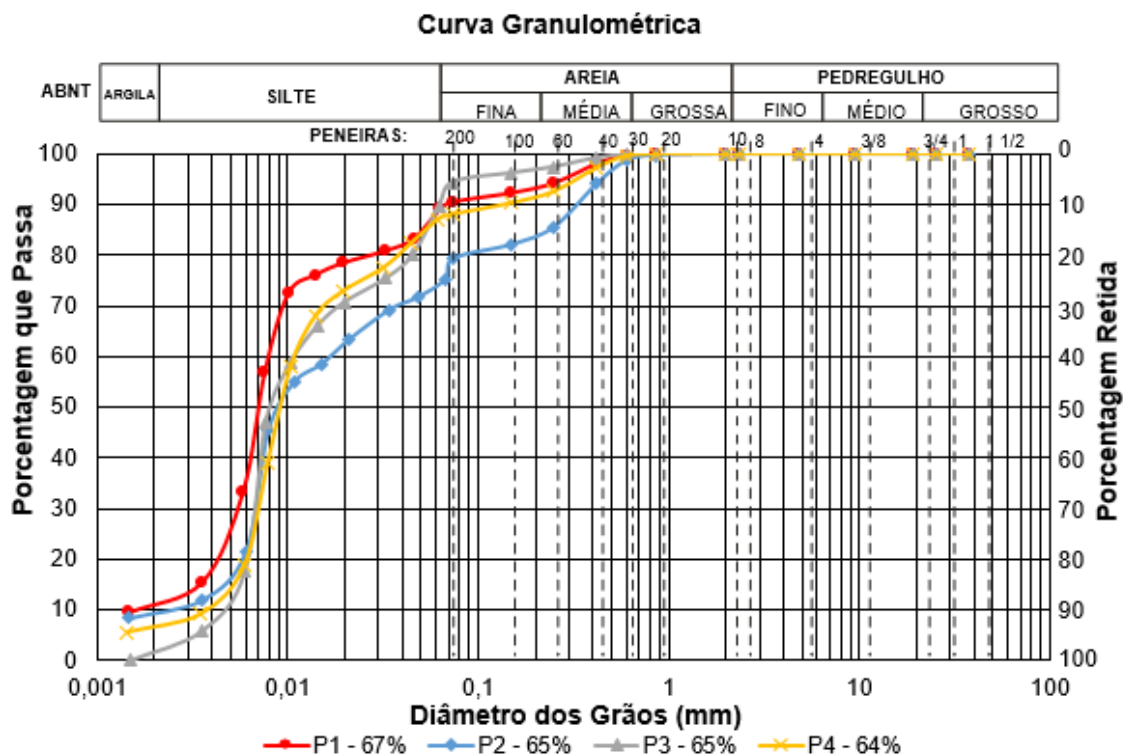


Figura 6.1 - Curvas granulométricas de amostras de sedimento superficial da Lagoa da Tijuca

Verifica-se que as amostras apresentam um percentual de partículas finas da ordem de 74 a 89% (Tabela 6.1) e que a porcentagem de materiais retidos na peneira nº 40 (0,42 mm) não ultrapassa 6% (Figura 6.1), comprovando a permissão normativa (<10%) para a utilização do procedimento de via úmida.

A correlação com a escala logarítmica denominada de escala phi (Φ) ou escala *Wentworth* mostrou que mais de 60% das amostras são compostas por silte (Figura 6.2). Por não possuir mais de 90% de areia constata-se que a caracterização química é necessária, conforme resolução nº 454/12 do CONAMA, descrita no capítulo 2.

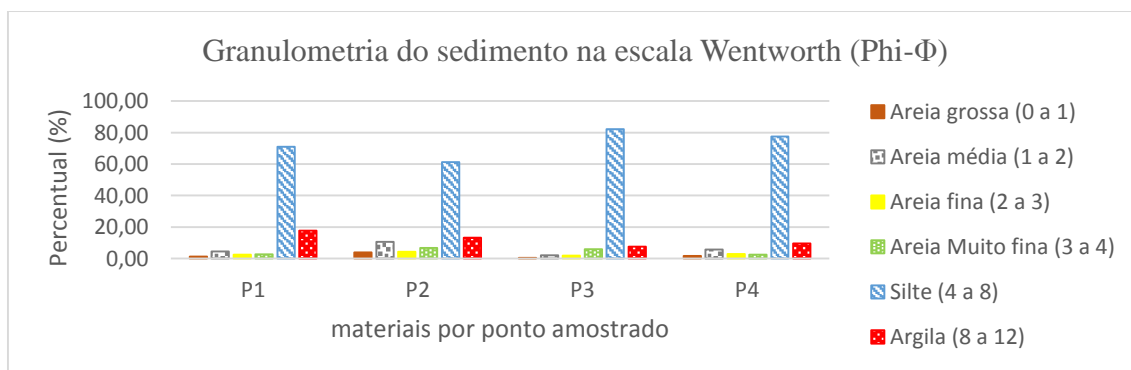


Figura 6.2 - Percentuais granulométricos do sedimento na escala Wentworth

O coeficiente de não uniformidade (Cnu) e o coeficiente de curvatura (CC), calculados a partir dos diâmetros abaixo do qual se situam 10, 30, e 60% das partículas, indicaram amostras com partículas de diâmetros variando em intervalo pequeno, sendo consideradas uniformes ($Cnu \leq 5$) e com predominância de descontinuidade ($CC \leq 1$), conforme se observa na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Coeficientes de Não Uniformidade (Cnu) e coeficiente de Curvatura (CC) das amostras de sedimento

Amostras compostas	Nomenclatura de ensaio	D ₉₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₁₀ (mm)	Cnu	CC
AC - Estação 12	P3 - 65%	0,065	0,014	0,010	0,007	0,004	4	1
AC - Estação 13	P1 - 67%	0,067	0,009	0,007	0,006	0,002	5	2
AC - Estação 14	P2 - 65%	0,336	0,016	0,009	0,007	0,003	5	1
AC - misto	P4 - 64%	0,139	0,013	0,008	0,007	0,004	3	1

Ao constatar coeficiente de não uniformidade (Cnu) maior que 3 (Tabela 6.2) o geotêxtil geralmente permite a passagem de partículas finas, conforme alertam Christopher & Fischer (1992).

A relação da abertura de filtração do geotêxtil (O_{90}) e o diâmetro característico do solo (D_{90}) variou de 0,7 a 3,7 e apresenta-se compatível com os critérios de retenção para filtragem de solos estruturados citados na literatura e constante na Tabela 3.5. Não obstante, o critério de retenção em tubos geotêxteis será ainda discutido com base no fluxo e regime hidráulico de enchimento na etapa de processo do sistema geotêxtil fechado.

Com relação aos limites de Atterberg, valores de 143 a 238% foram obtidos para limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP) encontrou-se na faixa de 51 a 70%, resultando em um material com alto índice de plasticidade (IP), variando de 92 a 168% (Tabela 6.3).

Tabela 6.3 - Limites de Atterberg e índices para amostras do sedimento da Lagoa da Tijuca

Amostras compostas	Nomenclatura de ensaio	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IA (%)
AC - Estação 12	P3 - 65%	185	55	130	65
AC - Estação 13	P1 - 67%	227	66	161	13
AC - Estação 14	P2 - 65%	238	70	168	17
AC - misto	P4 - 64%	143	51	92	13

Esses limites encontram-se dentro da faixa encontrada por Almeida; Borma e Barbosa, (2001) para a lagoa da Tijuca, ou seja, 73 a 355% para LL e 25 a 130% para LP.

O índice de atividade (IA) decorrente da carga superficial do argilomineral indicou uma argila ativa com valores de IA entre 13 e 65 (Tabela 6.3), muito acima do valor de 1,25 determinado como ativo no critério de Skempton (1953).

De acordo com o Sistema Unificado de Classificação do Solo (SUCS), a classificação desse material, cuja granulometria indica mais de 74% de finos, deve ser definida com base na carta de plasticidade de Casagrande. E assim, constata-se que as amostras se encontram próximas a linha A, sendo definidas como solo orgânico de alta plasticidade (OH), cor escura e odor característico.

Diante dos procedimentos utilizados para determinação do teor de matéria orgânica (T.M.O), ou seja, método químico com dicromato de potássio do manual Embrapa (97) e método térmico à 440°C da ABNT NBR 13.600/96, obteve-se o teor de matéria orgânica no sedimento natural e no sedimento lavado para retirada de salinidade.

Os resultados obtidos indicam teores de matéria orgânica variando de 10,9 a 16,9 % conforme observado na Tabela 6.4. Portanto, encontram-se dentro da faixa de 4 a 20% estabelecida por Pinto (2006) como típico de solos orgânicos.

Tabela 6.4 - Teor de matéria orgânica das amostras de sedimento

Amostras compostas	Nomenclatura de ensaio	Teor de M.O (NBR 13.600/96)	Teor de M.O	
			Lavado (NBR 13.600/96)	Teor de M.O (Embrapa/97)
AC - Estação 12	P3	16,1	13,9	12,5
AC - Estação 13	P1	16,2	14,0	11,4
AC - Estação 14	P2	16,9	14,5	14,6
AC - misto	P4	15,7	14,8	13,3

Como esperado, verifica-se que o método térmico apresentou maior percentual de matéria orgânica, provavelmente devido a queima de alguns argilominerais na mufla.

Com base no sistema francês do LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*) para classificação dos solos orgânicos, Borma (1998) alerta que do ponto de vista geotécnico, um solo pode ser considerado pouco orgânico se o teor de matéria orgânica estiver compreendido de 3 a 10%, considerando que para essa faixa o comportamento mecânico é determinado principalmente pelos componentes inorgânicos. Entretanto, como os resultados indicam mais de 10% de matéria orgânica há de se considerar um sedimento com baixa resistência, elevada compressibilidade, elevada

plasticidade, elevada retração, baixa condutividade hidráulica, redução do peso específico do solo e densidade real dos grãos.

A partir dos ensaios com picnômetros na chapa de aquecimento, definido pela NBR 6508/84, obteve-se a massa específica real do grão, que dividida pela massa específica da água a 4°C indicou uma baixa densidade real do grão (G_s) na faixa de 2,41 a 2,46 (Tabela 6.5), refletindo a influência da matéria orgânica e ratificando o valor de 2,45 obtido por Castiglia (2006).

Os valores do peso específico natural (γ_n) e a respectiva umidade natural (W_d) obtidos por meio de molde cilíndrico e estufa à 60°C, conforme ABNT NBR 6457/86 e procedimento adotado por Borma (1998) e Castiglia (2006) são apresentados na Tabela 6.5 juntamente com os demais parâmetros calculados, como: umidade ambiental (W_w), Teor de sólidos em peso (TSp) e o peso específico aparente seco (γ_d).

Tabela 6.5 - Caracterização geotécnica do sedimento com relação a densidade relativa do grão (G_s), pesos específicos aparentes (γ_n e γ_d), umidades (W_d e W_w) e teor de sólido em peso (TSp)

Amostras compostas	Nomenclatura de ensaio	G_s	γ_n (KN/m ³)	W_d (%)	W_w (%)	TSp (%)	γ_d (KN/m ³)
AC - Estação 12	P3	2,46	11,80	223,76	69,06	30,94	3,64
AC - Estação 13	P1	2,42	11,21	274,01	73,23	26,77	3,00
AC - Estação 14	P2	2,41	11,41	269,40	73,01	26,99	3,09
AC - Mistura	P4	2,44	11,66	249,15	71,33	28,67	3,34

O peso específico aparente natural, proveniente de amostra deformada, indica valores de 11,21 a 11,80 kN/m³ (Tabela 6.5), inferiores ao valor de 14,00 KN/m³ citado por Pinto (2006) para amostras indeformadas de argilas orgânicas moles. Portanto, característico de fundo náutico (lama fluida que permite navegabilidade) definido pela PIANC com limiar a 12,0 kN/m³ e encontrado próximo a 13,0 kN/m³ no porto de Roterdã (WURPTS & TORN, 2005).

As umidades com valores de 223,76 a 274,01% (Tabela 6.5) são influenciadas pela forma de coleta que não restringe, durante a retirada, o contato do sedimento com a coluna de água da lagoa. Devido a esse procedimento de coleta, o valor obtido não reflete a situação real de campo, mas será usado como referência, principalmente para preparação da lama com teor de sólido de 10%.

Com base em características de umidade e teor de sólido em peso, o diagrama da Figura 6.3 ilustra, em vermelho, a região da curva em que se encontram os sedimentos a serem dragados. Importante destacar que com a dragagem hidráulica esses sedimentos são diluídos na água de sucção e produzem uma lama com percentual de 10% em peso de sólidos, indicado na curva.

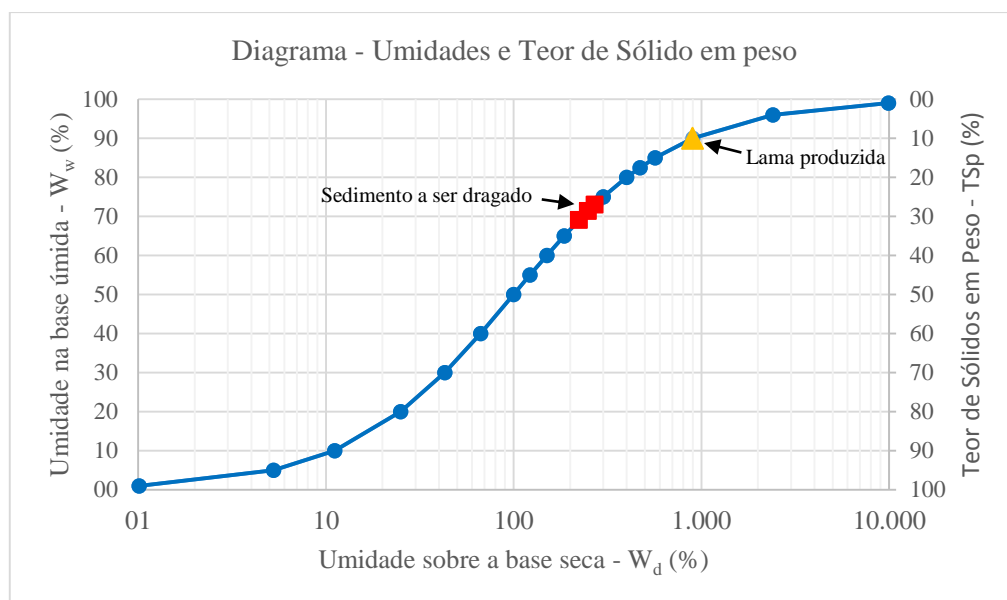


Figura 6.3 - Diagrama de umidades e teor de sólidos em peso, com indicação do sedimento a ser dragado e da lama produzida

6.1.2. Nutrientes e contaminantes inorgânicos

O Fósforo total (P-total) do sedimento, determinado com base no procedimento APHA SMEWW método 4500P-E e manual da Embrapa, encontra-se na faixa de 431,78 a 728,65 mg/kg, conforme apresentado na Tabela 6.6. Esses valores encontram-se abaixo da metade do valor de alerta de 2.000,00 mg/kg indicado pela resolução nº 454/12 do CONAMA e de acordo com a média de 560 mg/kg (mínimo de 250 e máximo de 1500 mg/kg) obtida a partir da rede de monitoramento do Inea em pontos do sedimento da lagoa da Tijuca.

Destaca-se que vários fatores afetam a disponibilidade do Fósforo, dentre eles o efeito do pH do meio, as condições de oxirredução, a concentração de fosforo solúvel na água sobrejacente ao sedimento e a natureza mineralogia das partículas que compõem o sedimento de fundo. Schaefer (2015) constatou que a taxa de dessorção de Fósforo do sedimento é maior em locais onde os teores de argila e carbono orgânico total são menores.

O Nitrogênio Kjeldahl Total (NTK) do sedimento compreende a soma do nitrogênio orgânico e amoniacal, ou seja, formas reduzidas que envolvem a zona de degradação e de decomposição ativa. Determinado por meio do procedimento APHA SMEWW método 4500-C e manual da Embrapa, o Nitrogênio Kjeldahl do sedimento variou de 3.229,48 a 3.600,65 mg/kg (Tabela 6.6), indicando um aumento com relação à média de 2.500,00 mg/kg obtida a partir da rede de monitoramento do Inea em pontos do sedimento da lagoa da Tijuca, mas ainda inferior a 4.800,00 mg/kg apontado como valor de alerta pela resolução nº 454/12 do CONAMA.

O Carbono Orgânico Total (COT) do sedimento obtido pelo procedimento APHA SMEWW método 5310B, referente a combustão catalítica a alta temperatura, indicou valores entre 21,8 a 35,2 g/kg equivalente a uma faixa de 2,18 a 3,52%. Portanto, bem abaixo do valor de alerta de 10% recomendado pela resolução nº 454/12 do CONAMA (Tabela 6.6) e de acordo com teores reportados em sedimentos de outros estuários (2,08 a 4,64%) citados por Alexandre, Huang e Madureira (2006).

Tabela 6.6 - Valores de nutrientes do sedimento (P-Total, NTK e COT)

Amostras compostas	Nomenclatura de ensaio	Fósforo total (mg/kg)	Nitrogênio Kjeldahl (mg/kg)	Carbono Orgânico Total (mg/kg)
Valores de alerta (res. 454/12)		2.000,00	4.800,00	100.000,00
AC - Estação 12	P3	728,65	3.229,48	33.342,35
AC - Estação 13	P1	548,03	3.600,65	35.225,62
AC - Estação 14	P2	431,78	3.270,88	30.023,24
AC - misto	P4	531,87	3.385,85	21.795,91

Com relação aos contaminantes inorgânicos, em especial aos metais: chumbo (Pb), Cobre (Cu), Zinco (Zn) e Ferro (Fe), a Tabela 6.7 indica os resultados obtidos por meio do procedimento EPA SW846 método 3051A, que promove digestão da amostra com água régia (9ml HNO₃ + 3ml HCl) sob alta temperatura e pressão em forno de micro-ondas e quantificação por Espectrometria de Emissão Óptica com Fonte de Plasma Indutivamente Acoplado (ICP OES) definido no procedimento EPA SW846 método 6010D.

Tabela 6.7 - Valores de metais traço (Pb, Cu, Zn e Fe) do sedimento

Amostras compostas	Nomenclatura de ensaio	Chumbo (Pb) (mg/kg)	Cobre (Cu) (mg/kg)	Zinco (Zn) (mg/kg)	Ferro (Fe) (mg/kg)
AC - Estação 12	P3	38,48	40,22	135,24	21.037,95
AC - Estação 13	P1	33,55	42,22	125,69	19.900,24
AC - Estação 14	P2	22,74	22,59	105,52	19.139,12
AC - misto	P4	29,07	35,70	112,96	19.758,15
Rede de monitoramento Média INEA - lagoa da Tijuca		31,55±46%	28,57±90%	132,57 ± 80%	15.000,00±52%
Valores orientadores (res. n° 454/12)		N1 = 46,70 N2 = 218,00	N1 = 34,00 N2 = 270,00	N1 = 150,00 N2 = 410,00	-

Diante dos valores de metais traço constantes na Tabela 6.7 verifica-se que apenas o Cobre apresentou concentração acima do valor orientador nível 1 (N1) de 34,0 mg/kg indicado pela resolução n° 454/12 do CONAMA.

Nos estudos de impacto ambiental elaborados para a dragagem do complexo lagunar de Jacarepaguá (MASTERPLAN, 2015), o Cobre também foi o metal que apresentou maior frequência de valores acima no nível 1, com destaque para a lagoa da Tijuca ⁴⁸ em que mais da metade dos pontos de caracterização indicaram valores acima do nível 1 para os sedimentos de superfície (Figura 6.4).

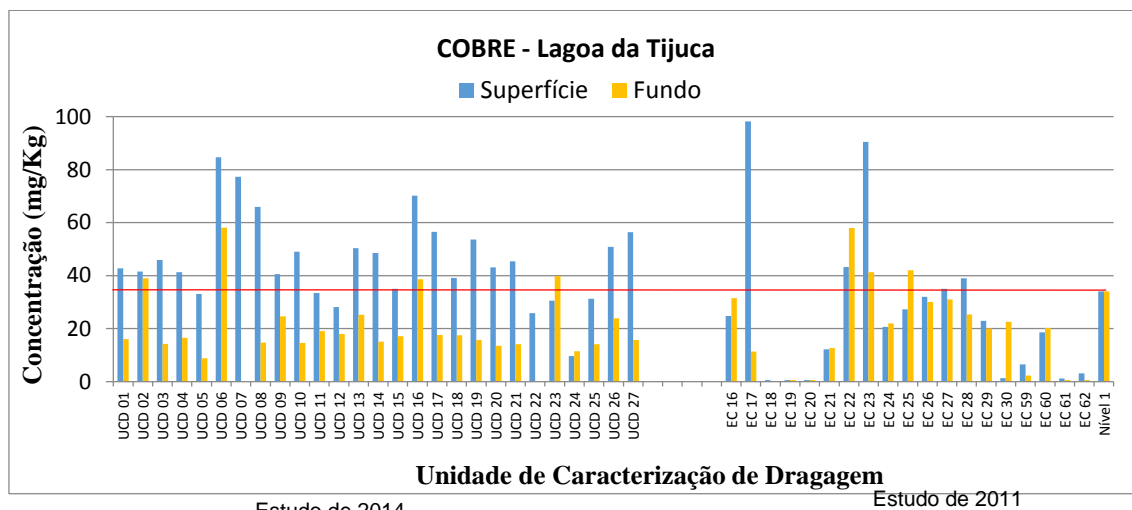


Figura 6.4 - Concentrações de cobre no sedimento de superfície (< 1m) e de fundo em Estações de Coleta (EC) e Unidade de Caracterização de Dragagem (UCD) da Lagoa da Tijuca (elaborado a partir de MASTERPLAN, 2015)

⁴⁸ Os estudos ambientais de 2011 e 2014 demonstram que na Lagoa da Tijuca os metais e a frequência de pontos com concentrações acima do nível 1 são: Cu (50,7%) > Zn (29,2%) > Pb (5,8%) > Ni (5,7%) > Hg (1,5%) > Cd (1,3%). Não houveram pontos com valores superiores ao nível 1 para o As e Cr.

Em geral, o cobre é um metal que ocorre em todas as rochas terrestres e as principais vias de entrada nos sistemas aquáticos são provenientes de resíduos de mineração e poeira, seguida pela produção de fertilizantes, esgotos domésticos e industriais (Masutti, 2004 e Rangel et al., 2012). Segundo esses autores, o cobre tem grande habilidade em interagir quimicamente com componentes minerais e orgânicos do solo, podendo formar precipitados com alguns ânions, como sulfatos, carbonatos e hidróxidos, inclusive acrescentam que esse metal é considerado o mais imóvel, sendo fortemente fixado pela matéria orgânica, por óxidos de Fe, Al e Mn e pelos minerais de argila.

Em estudo realizado em lagoas do complexo lagunar de Jacarepaguá, Fernandes (1991) identificou, além do cobre, o Chumbo e o Zinco como os metais de maior enriquecimento e observou procedimento distinto com relação a forma de retenção ao constatar que o Chumbo e o Zinco são preferencialmente retidos pelos óxidos e hidróxidos, enquanto o Cobre interage predominantemente com a matéria orgânica e sulfetos.

Ressalta-se que no presente trabalho as concentrações foram obtidas conforme essa resolução nº 454/12 do CONAMA, que recomenda o procedimento analítico de digestão parcial da fração total do sedimento. Contudo, os valores orientadores nela indicados são originários das diretrizes de qualidade de sedimento norte-americanas, que compilaram concentrações de metais traço relativas a procedimentos de extração total da fração fina de amostras de sedimentos não tropicais, conforme descrito no capítulo 2.

Esse fato demonstra a fragilidade da comparação, geralmente, subestimando as concentrações obtidas (digestão parcial da fração total) com relação aos valores orientadores estabelecidos (digestão total da fração fina). No entanto, essa prática tem sido utilizada nos estudos ambientais de dragagem, que seguem a resolução.

6.1.3. Parâmetros Complementares

Por definição, a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) é a soma total dos cátions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Al^{3+} , H^+) que os colóides de cargas negativas do sedimento atraem e os retêm.

Esses cátions trocáveis, obtidos pelo método do manual da Embrapa em ensaios realizados no laboratório de química da geotecnia da UFRJ, indicaram que a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) do sedimento encontra-se na faixa de 24,4 a 27,7 cmol_c/kg (Tabela 6.8).

Tabela 6.8 - Cátions trocáveis do sedimento superficial da lagoa da Tijuca

Amostras compostas	Nomenclatura de ensaio	Cátions Trocáveis (cmol _c /kg)						CTC
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Al ³⁺	H ⁺	
AC - Estação 12	P3	4,54	7,71	7,96	1,41	0,042	2,88	24,5
AC - Estação 13	P1	4,97	8,20	9,83	1,41	0,105	3,18	27,7
AC - Estação 14	P2	5,24	7,71	9,01	1,22	<0,01	1,45	24,6
AC - misto	P4	4,73	7,17	8,40	1,30	<0,01	2,80	24,4

Esse percentual de CTC, classifica o sedimento como de média a alta capacidade de troca de cátions, conforme escala definida por Jaramillo (1996) apud Castiglia (2006).

Segundo Ronquim (2010), o valor da CTC está relacionado a presença de matéria orgânica e a característica do argilomineral existente no solo. Em geral, solos ricos em matéria orgânica apresentam altos valores de CTC total e para solos com alta porcentagem de argilomineral a CTC dependerá do tipo de argilomineral existente. A faixa usual de valores da CTC para os argilominerais é indicada na Tabela 6.9.

Tabela 6.9 - Capacidade de Troca Catiônica de argilominerais (Stenveson, 1985 apud Borma, 1998)

Componente	CTC (cmol _c /kg)
caolinita	3 a 15
Ilita	20 a 60
montmorilonita	60 a 150
moscovita	160 a 200

Ao efetuar análise da CTC em sedimentos superficiais da lagoa de Jacarepaguá e lagoa de Camorim localizadas no complexo lagunar de Jacarepaguá, Borma (1998) identificou valores entre 28,6 e 75,1 cmol_c/kg, cujo limite inferior apresenta-se equiparado aos valores encontrados neste trabalho. Entretanto, a mesma autora relata que a caolinita é o argilomineral predominante na lagoa de Jacarepaguá e justifica-se com o fato de que a matéria orgânica pode formar uma espécie de cobertura nos minerais argílicos, e, conduzir a uma CTC relativa.

A determinação dos potenciais Hidrogeniônico (pH) do sedimento diluído em água (H₂O) e em cloreto de potássio⁴⁹ (KCl) foram conduzidos pelo método Embrapa. O pH do sedimento em H₂O variou de 3,86 a 4,95, ligeiramente maior que o pH do sedimento em KCl que ficou na faixa de 3,73 a 4,84 (Tabela 6.10).

Tabela 6.10 - Características complementares do sedimento (pH, Eh, CEE)

Amostras compostas	Nomenclatura de ensaio	Potencial de Hidrogênio (pH) H ₂ O	Potencial de Hidrogênio (pH) KCl	Potencial Redox (Eh) (mV)	Condutividade Elétrica específica (CEE) (mS/cm)
AC - Estação 12	P3	4,08	3,89	246	18,3
AC - Estação 13	P1	3,86	3,73	282	16,8
AC - Estação 14	P2	4,95	4,84	183	16,5
AC - misto	P4	4,19	3,96	278	17,8

Tais resultados de pH indicam um sedimento extremamente a fortemente ácido, tendo em vista o termo de classificação da reação utilizado no manual de pesquisa do solo do Departamento de agricultura dos Estados Unidos (USDA, 2007). Essa acidificação do solo ocorre devido a liberação de H⁺ nos processos de decomposição da matéria orgânica sob a ação de bactérias que geram amônia (NH₃) que se convertem em nitratos (NO₃), bem como na hidrólise do Alumínio (Al³⁺) presente no sedimento e na secreções de raízes, aspectos típicos de regiões estuarinas com manguezais e gigogas como a lagoa da Tijuca.

O potencial redox (Eh) do sedimento identificado na faixa de 183 a 282 mV (Tabela 6.10) induz a classificação de um sedimento anóxico, considerando que os sedimentos óxidos encontram-se na faixa de +300 a +800 mV (Yong, 1992 apud Castiglia, 2006). Lembra-se que quanto mais positivo for esse valor, maior a tendência da espécie para adquirir elétrons e ser reduzida.

De acordo com a agência de proteção ambiental americana valores de Eh inferiores a 100 mV indicariam concentração de sulfetos importantes para formação de complexos insolúveis com metais (USEPA, 2001).

⁴⁹ O pH determinado com KCl indica a acidez trocável, referente aos ions de Al³⁺ e H⁺ retidos na superfície dos coloides do solo. Forma a acidez potencial do solo quando somada a acidez não trocável, que considera o ion H⁺ de ligação covalente associados aos coloides e os compostos de alumínio.

A condutividade elétrica específica (CEE) do sedimento foi encontrada entre 16,5 e 18,3 mS/cm (Tabela 6.10), ligeiramente inferior os valores de 22 a 25 mS/cm relatados por Almeida, Borma e Barbosa (2001). Tal redução deve considerar o fato de que a velocidade atual da corrente de circulação registrada no canal de Joatinga corresponde a cerca de 1/3 da velocidade obtida por Falcão em 1995, conforme citado no capítulo 4 em item referente a troca hídrica das lagoas com o mar.

A fluorescência de raio X (FRX) indicou que a fração fina do sedimento é composta prioritariamente por sílica (SiO_2) com 43,1%, alumina (Al_2O_3) com 15,9%, óxidos ferroso (Fe_2O_3) com 11,6% e óxidos sulfúricos (SO_3) com 11,3%, seguido de demais compostos químicos conforme indicado na Tabela 6.11.

Segundo Borma (1998) os óxidos e hidróxidos também representam um importante papel na dinâmica dos metais traço do solo e podem ocorrer sob a forma de gel ou precipitados sólidos envolvendo as partículas dos minerais, e ainda como formas cristalinas distintas. Fernandes (1991) sugere que elementos de Zinco e Chumbo são preferencialmente retidos aos óxidos de ferro amorfos ou pouco cristalizados e essa afinidade se deve a rápida oxidação para valores de pH próximos a neutralidade. O mesmo autor indica que o Cobre interage melhor com a matéria orgânica e os sulfetos presentes no sedimento.

Tabela 6.11 - Composição da fração fina do sedimento com base na FRX em porcentagem (%)

Composição	Nomenclatura sistemática	P1	P2	P3	Média	desvio padrão
SiO ₂	Dióxido de silício (sílica)	46,0872	39,9718	43,1990	43,09	2,5
Al ₂ O ₃	Trióxido de dialumínio (alumina)	16,3307	14,7606	16,6731	15,92	0,8
Fe ₂ O ₃	Trióxido de ferro	11,0294	11,8315	11,8902	11,58	0,4
SO ₃	Trióxido de Enxofre (óxidos sulfúricos)	10,9641	11,2362	11,5861	11,26	0,3
Cl	Cloro	4,0353	6,5907	3,9584	4,86	1,2
Na ₂ O	Óxido de Sódio	3,8211	7,6150	4,7828	5,41	1,6
K ₂ O	Óxido de Potássio	2,4121	2,3834	2,4113	2,40	0,0
MgO	Óxido de Magnésio	1,8490	1,8462	1,9657	1,89	0,1
CaO	Óxido de Cálcio	1,6352	2,0810	1,6300	1,78	0,2
TiO ₂	Dióxido de Titânio	1,2254	1,0597	1,3182	1,20	0,1
P ₂ O ₅	Pentóxido de Difósforo	0,3836	0,3842	0,3823	0,38	0,0
MnO ₂	Dióxido de Manganês	0,0849	0,0703	0,0634	0,07	0,0
ZrO ₂	Óxido de Zircônio	0,0401	0,0657	0,0449	0,05	0,0
ZnO	Óxido de Zinco	0,0295	0,0233	0,0227	0,03	0,0
SrO	Óxido de Estrôncio	0,0277	0,0343	0,0278	0,03	0,0
Br	Bromo	0,0244	0,0277	0,0246	0,03	0,0
CuO	Óxido de Cobre	0,0203	-	-	0,02	0,0
Rb ₂ O	Óxido de Rubídio	-	0,0183	0,0197	0,02	0,0

Com base na composição da fração fina constante na Tabela 6.11 pode-se inferir a presença de argilomineral ao considerar que esse é o nome técnico utilizado para definir minerais constituídos por silicatos hidratados de alumínio e ferro, e que podem conter elementos como sódio, potássio, cálcio e magnésio.

Na difração de raio X (DRX) da fração fina detectou-se que as espécies de argilominerais presentes nas amostras de sedimento são: caulinita, montmorilonita, illita e muscovita, cujos picos foram identificados no difratograma da Figura 6.5 e as características são apresentadas na Tabela 6.12.

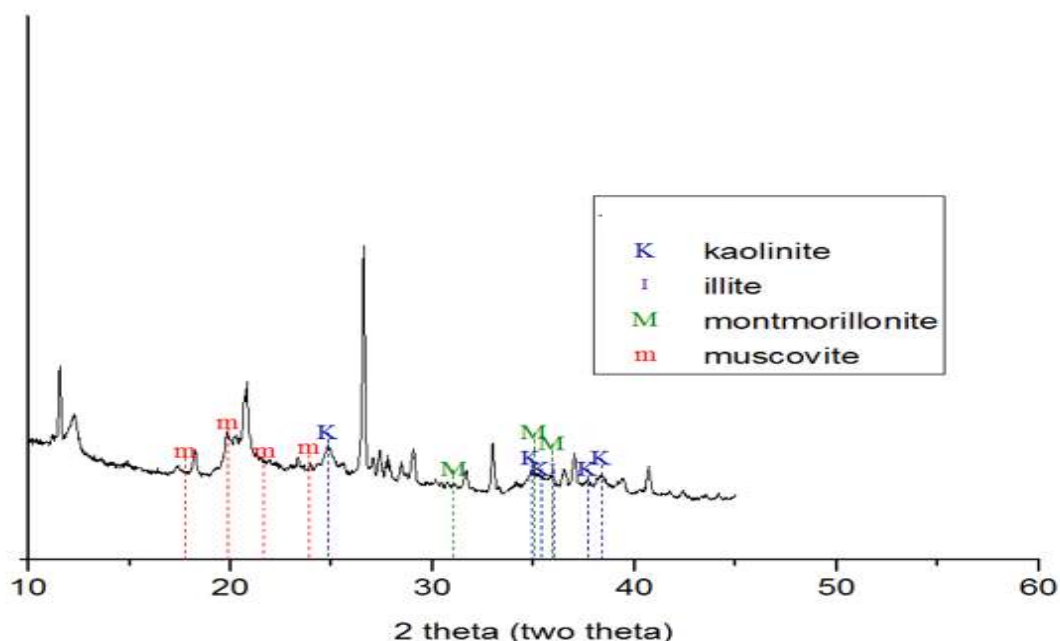


Figura 6.5 - Difratoograma com detecção de picos de argilominerais no sedimento da estação coleta 12

Tabela 6.12 - Características de argilominerais encontrados no sedimento pela FRX

Argilomineral	Características
Caulinita	Argilomineral 1:1, não expansivo, área superficial específica de 30 m ² /g, baixa CTC entre 3 e 15 meq/100g, baixa plasticidade (IP: 10-30%); densidade 2,62 a 2,66, boa agregação e permeabilidade. Distância basal 7,2 A. Fórmula química: Si ₂ Al ₂ O ₅ (OH) ₄
Ilita	Argilomineral 2:1, pouco expansivo; área superficial específica de 80 m ² /g; baixa plasticidade (IP: 25-85%); CTC de 20 a 60 meq/100g, densidade 2,6 a 2,9. Distância basal 10 A. Fórmula química: (K, H ₃ O) (Al, Mg, Fe) ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ , (H ₂ O)]
Muscovita	Argilomineral 2:1; parcialmente expansiva; baixa plasticidade; CTC de 160 a 200 meq/100g; densidade de 2,76 a 3,0. Fórmula química: KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂
Montmorilonita	Argilomineral 2:1, altamente expansivo, área superficial específica de 800 m ² /g (grande capacidade de reter íons), CTC entre 60 e 150 meq/100g, elevada plasticidade (IP: 60-600%); densidade 2,75 a 2,78. Distância basal 10 a 20 A. Fórmula química: (Na,Ca) _{0,3} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ .nH ₂ O

6.2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA DA LAGOA DA TIJUCA

A caracterização da água da lagoa da Tijuca foi realizada conforme metodologias analíticas indicadas nos itens 5.3 e contempla parâmetros relativos ao potencial Hidrogeniônico (pH), potencial redox (Eh), condutividade elétrica específica (CEE), Oxigênio dissolvido (OD), Carbono orgânico total (COT), Fósforo total (P-total), série nitrogenada (Amoniacal, Kjeldahl, Nitrito, Nitrato), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO). Verificou-se ainda a presença de sólidos (turbidez e sólidos totais: suspensos e dissolvidos) e metais traço (Cobre, Chumbo, Ferro e Zinco).

6.2.1. Parâmetros medidos diretamente em campo

Os parâmetros como pH, Eh, CEE, OD e temperatura foram medidos por aparelhos multiparâmetros utilizados diretamente no campo (Figura 6.6), cujos valores obtidos em cada campanha são expressos na Tabela 6.13.



Figura 6.6 - Multiparâmetros para monitoramento da água nas duas campanhas de coleta

Tabela 6.13 - Dados de parâmetros monitorados diretamente na água da lagoa da Tijuca

Campanha	Amostras	pH	Eh (mV)	CEE (mS/cm)	OD (mg/l)	Temperatura (°C)
1°	AC – EC12	8,89	183	6,9	6,1	27,4
	AC – EC13	9,16	190	8,2	6,5	29,7
	AC – EC14	9,26	174	7,9	7,2	29,3
2°	AC – EC12	8,11	223	55,5	5,8	24,0
	AC – EC13	8,13	219	56,5	6,0	24,1
	AC – EC14	8,20	242	54,0	6,2	24,2

Nota:

pH: potencial hidrogeniônico; Eh: Potencial redox; CEE: condutividade elétrica específica; OD: oxigênio dissolvido

Para a proteção da vida aquática a resolução nº 357/05 do CONAMA indica que o potencial Hidrogeniônico (pH) deve estar entre 6,5 e 8,5. Nos pontos analisados foram encontrados pH na faixa de 8,11 a 9,26 (Tabela 6.13). A redução do pH pode interferir em liberação de substâncias tóxicas como os metais, tornando-os biodisponíveis conforme condições de acidez do ambiente, bem como de oxidação e redução. Por outro lado, quanto maior o pH, maior é a estabilidade dos compostos orgânicos formados a partir de mecanismos de complexação e quelação na interação solo e água. Mestrinho (2006) complementa no caso em que $\text{pH} < 5$ os metais são mais facilmente solubilizados e tornam as águas mais tóxicas, mas com valores mais elevados, os metais tendem a precipitar.

O potencial redox (Eh), que representa a tendência de adquirir ou doar elétrons, indica valores positivos na faixa de 174 a 242 mV (Tabela 6.13), demonstrando maior índice de espécies oxidadas com tendência a receber elétrons e serem reduzidas.

Em função da capacidade elétrica específica (CEE) verifica-se que na primeira campanha os valores de 6,9 a 8,2 mS/cm (Tabela 6.13) indicam, conforme equação de calibração citada no item 5.2, um salinidade na faixa de 3,6 a 4,4 ‰. Tal concentração corresponde a uma água salobra, tendo em vista a resolução nº 357/05 do CONAMA que a classifica na faixa de 0,5 a 30 ‰. Na segunda campanha, a água apresentou valores de CEE entre 54,0 e 56,5 mS/cm (Tabela 6.13), indicando uma salinidade aproximada de 37 ‰, característico de uma água salgada.

Tal alteração na salinidade pode ter ocorrido em função da interferência proporcionada pela variação da tábua de maré entre as duas campanhas de coleta. Os valores apresentados pela Figura 6.7 indicam uma boa concordância com os valores obtidos neste estudo, principalmente para o valor máximo entre os anos de 1986 e 2013.

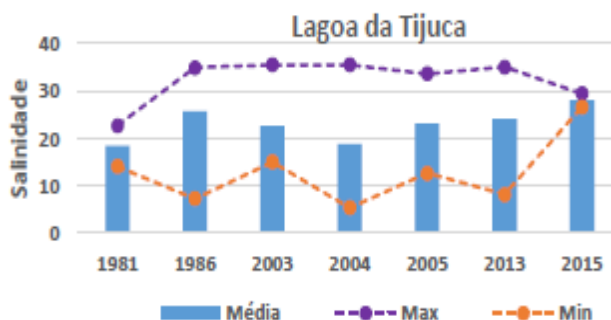


Figura 6.7 - Salinidade na Lagoa da Tijuca (MASTERPLAN, 2015)

Com relação ao oxigênio dissolvido (OD) foram encontrados valores entre 5,8 a 7,2 mg/l (Tabela 6.13). Esses valores estão dentro da faixa obtida pela rede de monitoramento do Instituto Estadual de Meio Ambiente do Rio de Janeiro, cujo processamento de dados históricos da Lagoa da Tijuca são apresentados na Figura 6.8.

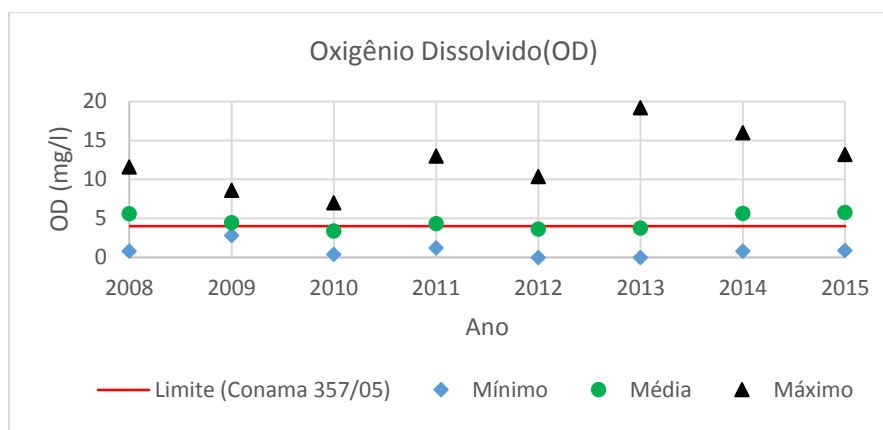


Figura 6.8 - Oxigênio Dissolvido na Lagoa da Tijuca (elaborado a partir de INEA, 2015)

A resolução nº 357/05 do CONAMA estabelece valor mínimos de 4 mg/l de oxigênio dissolvido para corpo hídrico salobro classe 2. Valores inferiores são indícios de água poluída por esgoto onde o OD é consumido no processo de decomposição da matéria orgânica. Lagoas com crescimento de algas devido a excesso de nutrientes e condições eutróficas podem apresentar concentrações de oxigênio maiores que 10 mg/l, devido a fotossíntese durante o dia, mas a noite a inexistência de fotossíntese provoca a diminuição da concentração de oxigênio (ANA, 2016).

6.2.2. Nutrientes e carga orgânica da água da lagoa da Tijuca

Os parâmetros referentes aos nutrientes (Fósforo e Nitrogênio) bem como à carga orgânica, determinada por medição direta através do Carbono Orgânico Total (COT) ou indireta por meio da Demanda Bioquímica de oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO), foram analisados em triplicata no Laboratório de Engenharia do Meio Ambiente (LEMA) da UFRJ conforme descrito nos materiais e métodos.

As concentrações médias e respectivos desvios padrões do Fósforo Total (P-total), de elementos da série nitrogenada (Nitrogênio Total Kjeldahl, Nitrogênio Amoniacal, Nitrito, Nitrato) e da carga orgânica (COT, DBO e DQO) são apresentados na Tabela 6.14 conforme a campanha de coleta da água na lagoa da Tijuca.

Tabela 6.14 - Valores de Nutrientes, COT, DBO e DQO da água da Lagoa da Tijuca

Parâmetros	Valores orientadores		
	Água salobra classe 2 (357/05)	1ª Campanha	2ª Campanha
Fósforo total (P-total) (mg/l)	0,186	0,71 ± 0,20	0,25 ± 0,30
Nitrogênio Amoniacal (NH ₄ + NH ₃) (mg/l)	0,7	0,90 ± 0,14	0,70 ± 0,25
Nitrogênio Kjeldahl Total (NTK) (mg/l)	-	26,20 ± 11,95	15,00 ± 7,12
Nitrito (NO ₂ ⁻) (mg/l)	0,2	0,25 ± 0,03	0,20 ± 0,05
Nitrato (NO ₃ ⁻) (mg/l)	0,7	3,60 ± 0,29	0,11 ± 0,10
Carbono Orgânico Total (COT) (mg/l)	5,0	10,95 ± 0,39	12,50 ± 0,25
Demanda Bioquímica Oxigênio (DBO)(mg/l)	-	77,63 ± 14,51	58,45 ± 20,23
Demanda Química Oxigênio (DQO) (mg/l)	-	161,80 ± 33,81	138,50 ± 40,50

Observa-se na Tabela 6.14 que o Fósforo total se encontra com concentrações acima do valor orientador definido para as águas salobras de classe 2, especialmente na primeira campanha. Entretanto, essas concentrações de Fósforo total estão dentro da faixa de 0,2 a 2,5 mg/l identificada a partir de dados históricos do monitoramento feito pelo Instituto estadual do meio ambiente em ponto próximo ao da coleta (Inea, 2015).

No que se refere a série nitrogenada, constata-se na Tabela 6.14 que o nitrogênio amoniacal, forma reduzida do nitrogênio que representa uma decomposição ativa, possui concentrações ligeiramente superiores ao valor de referência para água salobra classe 2 (0,7 mg/l). O Nitrogênio Orgânico, obtido pela diferença entre o Nitrogênio Total Kjeldahl e o Nitrogênio Amoniacal, representa o estágio inicial de poluição e encontra-se maior na primeira campanha de coleta. Estes fatos, aliado as concentrações de Nitrato, forma oxidada do Nitrogênio, permite inferir que a segunda campanha de coleta ocorreu melhores condições da água, com valores de Nitrato abaixo do limite máximo de 0,7 mg/l.

A carga orgânica representada diretamente pelo Carbono Orgânico Total (COT) indica concentrações de 10,95 e 12,5 mg/l (Tabela 6.14), maiores que o dobro de 5,0 mg/l, sugerido como limite para água salobra classe 2 na resolução nº 357/05 do CONAMA. De forma indireta, os valores de DBO corroboram com o indicativo de elevada matéria orgânica carbonácea, embora essas concentrações sejam inferiores a 26% do valor de 300 mg/l, típico de esgoto segundo Von Sperling (2005).

A Relação DQO/DBO menor que 2,5 indica fácil biodegradação da carga orgânica presente, conforme indicativo de tratabilidade citado em Jardim e Canela (2004)⁵⁰.

6.2.3. Sólidos e Turbidez da água da lagoa da Tijuca

Com relação a presença de sólidos (sólidos totais, suspensos e dissolvidos) e turbidez observa-se na Tabela 6.15 que a água da segunda campanha apresenta características melhores que a primeira para todos esses parâmetros. Destaca-se na série histórica do monitoramento do Instituto Estadual do Meio Ambiente do Rio de Janeiro que a variação da turbidez tem sido comum entre 3,4 a 60 NTU (INEA, 2015).

Tabela 6.15 - Valores de sólidos e Turbidez da água da Lagoa da Tijuca

Parâmetros	1ª Campanha	2ª Campanha
Sólidos Totais (ST) (mg/l)	4.389,1	755,7
Sólidos dissolvidos (SDT) (mg/l)	4292,1	670,0
Sólidos suspensos (SST) (mg/l)	97,0	85,7
Turbidez (NTU)	41	21

6.2.4. Metais traço da água da lagoa da Tijuca

A verificação de metais traço na água foi realizada para o Cobre, Chumbo, Ferro e Zinco, mas em nenhuma das duas campanhas de coleta foram identificadas concentrações acima dos valores orientadores para água salobra – Classe 2 (Tabela 6.16). Entretanto, dados de monitoramento do INEA, em ponto próximo, detectou que o cobre e o ferro dissolvido extrapolaram os valores orientadores em algumas análises, alcançando concentrações de 0,015 e 0,6 mg/l, respectivamente.

Tabela 6.16 - Valores de metais (chumbo, Cobre, Zinco e Ferro) na água da Lagoa da Tijuca

Parâmetros	Valores orientadores Água salobra classe 2 (357/05)	1ª Campanha	2ª Campanha	Monitoramento INEA (2015)
Chumbo Totalal (Pb) (mg/l)	0,21	nd	nd	0,005 a 0,11
Cobre dissolvido (Cu) (mg/l)	0,0078	nd	nd	0,002 a 0,015
Zinco Total (Zn) (mg/l)	0,12	nd a 0,078	nd	0,005 a 0,07
Ferro dissolvido (Fe) (mg/l)	0,3	0,01 a 0,04	nd	0,3 a 0,6

Obs.: nd = não detectado

⁵⁰ A tratabilidade de efluente conforme a relação DQO/DBO:

DQO/DBO < 2,5 – Facilmente biodegradável;

2,5 ≤ DQO/DBO ≤ 5 – requer melhor escolha do processo biológico

DQO/DBO > 5 – processo biológico com pouco sucesso, recomenda-se oxidação química

Diante de todos os parâmetros de água analisado, comprova-se que a água sofre variação constante e possivelmente isso ocorre devido a interferências de aspectos como a precipitação e ciclo de maré.

6.3. CONCLUSÕES PARCIAIS

Essa etapa de caracterização do sedimento de superfície e da água da lagoa da Tijuca, pertencente ao complexo lagunar de Jacarepaguá, permitiu constatar que:

- O sedimento de superfície a ser dragado na lagoa da Tijuca, que compôs a lama de dragagem representativa deste estudo, consiste em um solo orgânico de alta plasticidade, cor escura e odor característico. Esse sedimento apresenta teor de finos superior a 74%, teor de matéria orgânica equivalente a 12,3% , índice de plasticidade variando de 92 a 168%, peso específico aparente próximo a 11,5 kN/m², densidade relativa dos grãos de 2,4 e 27% de teor de sólidos em peso;
- No critério ambiental, esses sedimentos apresentam-se como característicos de sistema lagunar com interferência antrópica, haja vista a carga de nutrientes indicando Fósforo total na faixa de 431,8 a 728,6 mg/kg e Nitrogênio Kjeldahl total entre 3.229,5 e 3.600,0 mg/kg. Os metais: Chumbo, Cobre, Níquel e Zinco apresentam valores médios de 30,9±6,7, 35,2±8,8, 18,5±2,3 e 119,4±13,2 mg/kg, respectivamente. Acrescenta-se condutividade elétrica específica de 17,4 mS/cm, pH de 4,3 e capacidade de troca catiônica de 25,3 cmol_c/kg;
- Nas águas da lagoa da Tijuca encontram-se aspectos de poluição hídrica, com indicação de Fósforo total, Nitrogênio amoniacal e Carbono orgânico total com valores acima dos padrões definidos para enquadramento de classe 2 - salobra. Valores de pH igual a 9 e Oxigênio dissolvido de 6 mg/l também se encontram próximos aos limites do enquadramento. Os parâmetros metálicos relativo ao chumbo, cobre, níquel e zinco não apresentaram teores significativos. Devido a variação de maré as coletas de água indicaram uma condutividade elétrica específica entre 7,7 e 55,3 mS/cm.

7. PRODUÇÃO E CONDICIONAMENTO DA LAMA DE DRAGAGEM

7.1. PROPORÇÕES DE SEDIMENTO E ÁGUA NA PRODUÇÃO DA LAMA

Ao considerar que a dragagem hidráulica opera succionando lama com teor de sólidos em peso (TSp) entre 10 e 20% e que em dragagens ambientais teores ainda inferiores são recomendados para reduzir a ressuspensão de materiais (USEPA, 1994), efetuou-se a mistura de água e sedimento para a formulação inicial de lamas com teores de sólido em peso (TSp) equivalente 10%. Braga e França (2009) citam que o teor de sólidos em peso da lama de dragagem do Canal do Fundão no Rio de Janeiro foi de 13,6%.

A quantidade de água da lagoa a ser adicionada ao sedimento coletado para alcançar esse percentual de 10 % foi calculada com base nas equações 5.14 e 5.15 (constantes no capítulo 5 - materiais e métodos) considerando a umidade (W_d) e o massa úmida (M_u) aferida em cada amostra representativa do sedimento a ser utilizado.

Como as amostras de sedimento aferiram umidades geotécnicas (W_d) de 223,76 a 274,01% (Tabela 6.5) foi possível definir a massa seca de 267,0 a 309,0 gramas para cada 01 (um) quilograma da amostra, bem como o acréscimo de 1,7 a 2,1 litros de água da lagoa para se formar uma lama de dragagem com 10% de sólido em peso. Em outras palavras, de acordo com a equação 5.10, em cada 01 (um) quilograma da amostra de sedimento coletado se produz aproximadamente um volume de até 3,0 litros de lama dragada, conforme valores indicados (Tabela 7.1).

Tabela 7.1 - Quantidades definidas para produção da lama de dragagem a 10% de sólidos

Medidas para 1 kg de amostra	unidade	quantidade
Massa seca (M_s) – eq. 5.14	kg	0,267 a 0,309
Volume de água a acrescentar (V_{aa}) – eq. 5.15	litros	1,7 a 2,1
Volume de lama de dragagem (V) – eq. 5.10	litros	2,5 a 2,9

Como a densidade relativa dos grãos foi aferida entre 2,41 e 2,46 (Tabela 6.5) pode-se dizer que a mistura corresponde a aproximadamente 110 gramas de sedimento seco por litro de água. De acordo com a classificação apresentada em Santos e Alves (2001) essa concentração de sólidos indica uma suspensão intermediária (50g/l a 210g/l), entre a diluída e concentrada.

Para o cálculo dessas medidas, as densidades das lamas produzidas e da água da lagoa foram aferidas em duplicata por picnômetros de 25 ml obtendo, na pressão normal à temperatura de 25°C, médias e desvios padrão equivalentes a $1,07 \pm 0,02$ e $1,01 \pm 0,02$, respectivamente. Esse último valor condiz com o fato de que a massa específica da água salobra pode variar de 1,0 a 1,17 g/cm³.

Ao efetuar os cálculos dos teores de sólidos em volume (TSv) pela equação 5.8 foram obtidos valores da ordem de 4 % e na conferência do teores de sólidos em peso (TSp) o valor médio e desvio padrão obtido foi de $10,0 \pm 0,82$ (Tabela 7.2), considerado coerente com o valor inicialmente adotado.

Tabela 7.2 – Parâmetros físicos aferidos na lama de dragagem produzida

Parâmetros	unidade	Valor
Densidade da lama de drenagem (ρ)	-	$1,07 \pm 0,02$
Teor de sólido em peso (TSp)	%	$10,0 \pm 0,82$
Teor de sólido em volume (TSv) – eq. 5.8	%	4,35 a 4,44

Numa visão comparativa do teor de sólido, o lodo bruto gerado numa estação de tratamento de esgoto apresenta teor de sólido em peso na faixa de 1 a 5%. Afim de prepará-lo para uma destinação final adequada, esse lodo costuma passar por uma ou mais operações específicas, onde os processos de adensamento/espessamento⁵¹, estabilização/digestão⁵², condicionamento, desaguamento⁵³ e higienização⁵⁴ podem ser empregados.

Desta forma, o lodo adensado tem alcançado teor de sólido em peso de 10 %, embora valores típicos variem de 4 a 6%. Por fim, o lodo desaguado (torta) pode atingir teor de sólido em peso de 40% conforme o tipo de estabilização, o condicionamento e a técnica de desaguamento empregada (Pedroza et al., 2010; Jordão e Pessôa, 2013).

⁵¹ Processo que promove a concentração inicial de sólidos no lodo e remoção parcial da água, geralmente, ocorre por gravidade ou flotação (JORDÃO; PESSÔA, 2013).

⁵² Processo aeróbio ou anaeróbio de remoção da matéria orgânica biodegradável em líquidos, sólidos dissolvidos, subprodutos gasosos e alguma destruição de microorganismos patogênicos, com redução dos sólidos secos do lodo.

⁵³ Processo empregado para redução da umidade do lodo, onde as técnicas geralmente empregadas no desaguamento são o leito de secagem, centrífuga, filtro prensa de placas e de esteiras (ALÉM SOBRINHO, 2001).

⁵⁴ Processo que visa reduzir ou eliminar os microorganismos patogênicos presentes no lodo/torta.

Neste sentido e com vista a melhorar as características de separação das fases sólido-líquida da lama de dragagem fabricada, promoveu-se o processo de condicionamento com dosagem definida de polímero.

7.2. DOSAGEM DO POLÍMERO NO CONDICIONAMENTO DA LAMA

Considerando que a lama de dragagem de 10% de teor de sólidos foi produzida por um sedimento orgânico composto com mais de 74% de finos, mais de 10,9 % de matéria orgânica e com argilomineral com alto índice de atividade ($IA > 13$), o processo de desaguamento torna-se mais efetivo com o condicionamento a priori dessa lama.

Esse condicionamento da lama implica na adição de polímeros que induzem a neutralização ou desestabilização das forças elétricas da superfície de partículas (coagulação) e permitem a formação de flocos (floculação), principalmente quando ocorre uma agitação controlada do fluido.

O tipo e a dosagem do polímero foram definidos seguindo os procedimentos relatados nos materiais e métodos, que envolveram o ensaio de cone/mini funil (1ª e 2ª etapas) e o refinamento no ensaio de *Jar test*.

7.2.1. Resultados dos ensaios de cone/mini funil – Primeira etapa

Tendo em vista que as partículas finas são carregadas negativamente, 05 (cinco) polímeros catiônicos da empresa Kemira foram testados com solução de 0,1% (1 g/l) em 08 (oito) dosagens que variaram de 30 a 240 mg/l de lama. Bhatia e Satyamurthy, (2009) testaram dosagens de 25 a 200 mg/l de polímero para o condicionamento de lama com sedimentos finos visando desidratação em cinco geotêxteis com teste de filtração de pressão.

Com os dados de tempo e volume percolado foi calculada a vazão média de desaguamento para cada dosagem conforme visualiza-se na Figura 7.1.

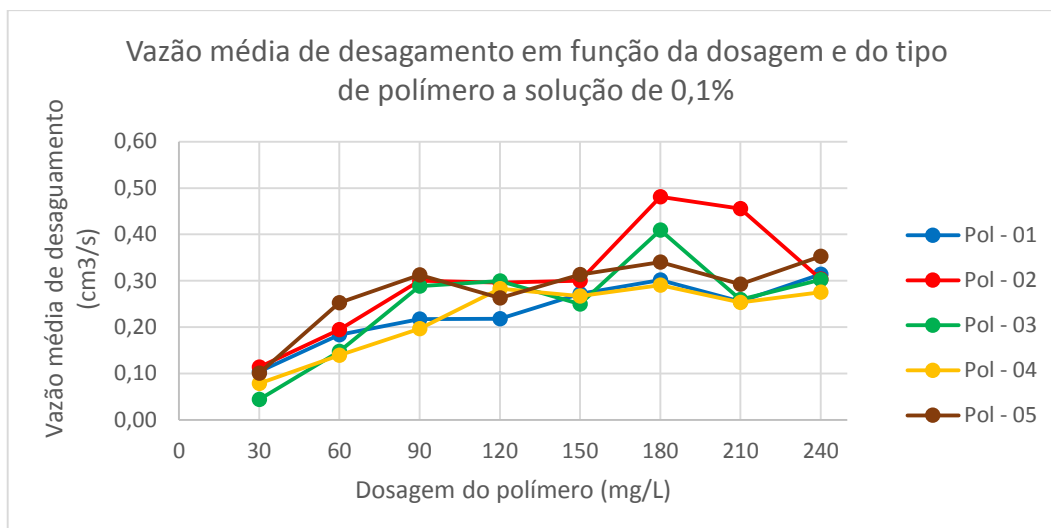


Figura 7.1 - Vazão média de desaguamento da Lama de dragagem em geotêxtil tecido com relação a dosagem e o tipo do polímero a solução de 0,1%.

Observa-se que a maior vazão média de desaguamento ($0,48 \text{ cm}^3/\text{s}$) foi aquela em que se adicionou 180 mg/l do polímero Pol-02, representando a mistura com melhor resultado de filtração no que se refere a avaliação conjunta da quantidade do percolado e tempo de filtração.

Com relação à característica de qualidade do percolado, verifica-se que o pH oscila entre 6 a 6,5 e a turbidez reduz drasticamente para valores abaixo de 30 FAU a partir da dosagem de 90 mg/l de polímero, conforme se constata Figura 7.2. Valores de turbidez para a dosagem de 30 mg/l não foram plotados no gráfico tendo em vista apresentarem-se muito acima do limite superior indicado na ordenada (y).

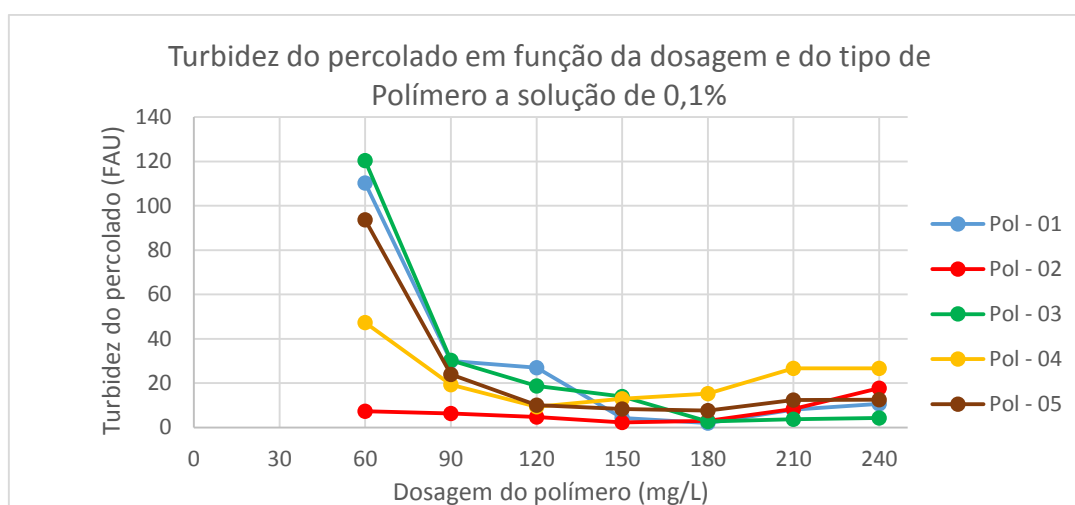


Figura 7.2 - Turbidez do percolado com relação a dosagem e o tipo do polímero utilizado em solução de 1%.

A dosagem de 180 mg/l dos polímeros Pol-01, Pol-02 e Pol-03 apresentaram os menores valores de turbidez, representando redução significativa na quantidade de sólidos suspensos (partículas com $\varnothing < 1,2 \mu\text{m}$) devido a retenção do material no mini funil geotêxtil de 240 μm (± 40) de abertura de filtração e no pré-filtro formado (*filter cake*), citado no cap.3.

Na avaliação conjunta da vazão de desaguamento e a turbidez do percolado verifica-se que o melhor desempenho foi alcançado com o polímero 02 na dosagem de 180 mg/l.

O condicionamento com essa configuração (solução de 0,1% do Pol-02 e dosagem de 180mg/l), indica uma eficiência de desaguamento (ED)⁵⁵ de 67,24%, pois partiu de uma lama com teor de sólido de 10% para uma torta imediata com 16,6%. Essa mesma configuração apresenta uma eficiência de infiltração (EI)⁵⁶ de 44%, ao relacionar as umidades da lama de 900% e da torta de 501,6%.

7.2.2. Resultados dos Ensaios de cone/mini funil – Segunda etapa

Nesta etapa, os 03 (três) polímeros que apresentaram melhores resultados de turbidez na primeira etapa (Pol-01, Pol-02 e Pol-03) foram testados com solução de 1% (10g/l), 0,5% (5g/l) e novamente 0,1% (1g/l), para dosagens na lama que variaram de 30 a 270 mg/l.

Ao seguir a rotina do ensaio de mini funil, os dados de tempo e volume percolado coletados permitiram identificar vazão média de desaguamento para as diferentes dosagens de cada um dos polímeros e suas respectivas soluções, conforme constata-se na Figura 7.3.

⁵⁵ calculada nos moldes de Moo-Young et al. (2002), ver Tabela 3.13.

⁵⁶ calculada de acordo com o modelo de Muthukumaran e Ilamparuthi (2006), ver Tabela 3.13.

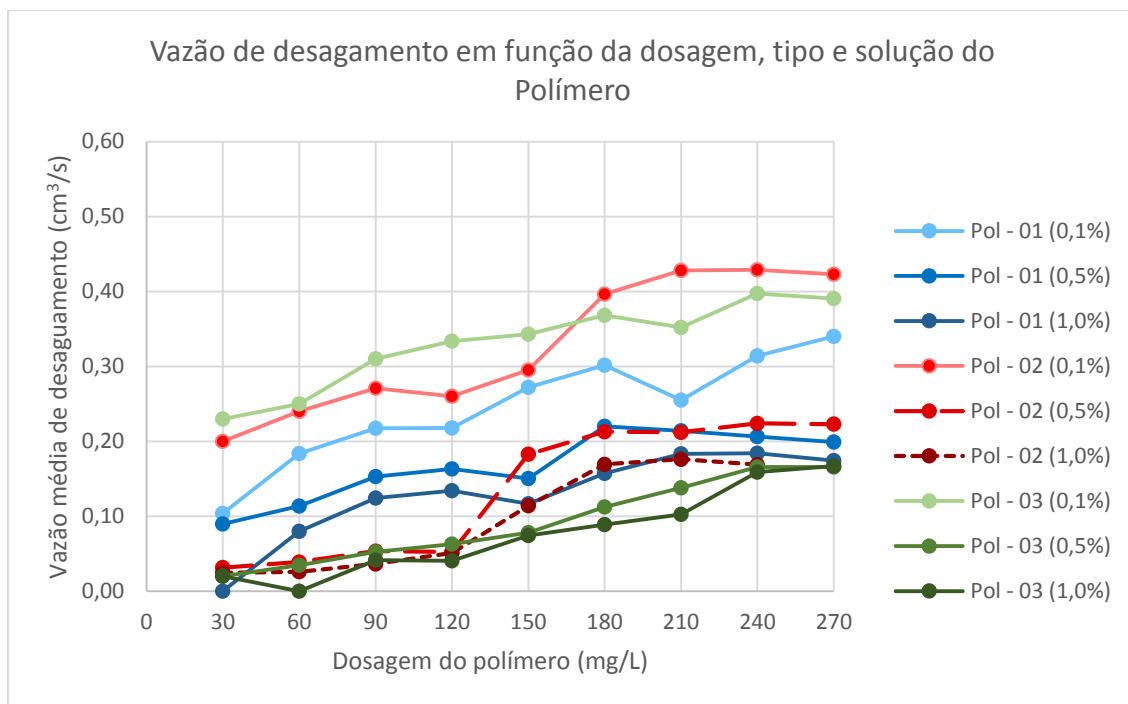


Figura 7.3 - Vazão média de desaguamento da Lama de dragagem em geotêxtil tecido com relação a dosagem, tipo e solução do polímero.

Observar-se na Figura 7.3 que em concentrações de 0,1 % de polímero a maior vazão de escoamento é de $0,45 \text{ cm}^3/\text{s}$, enquanto que para soluções de 0,5% e 1,0 % a maior vazão cai para $0,22 \text{ cm}^3/\text{s}$ e $0,18 \text{ cm}^3/\text{s}$ respectivamente. Desta forma, nota-se que um polímero com solução mais diluída (0,1%), normalmente apresenta vazões médias de desaguamento maiores que o mesmo polímero com solução mais concentrada (1,0 %).

Verifica-se ainda que as dosagens de 180 mg/l apresentam características significativas da vazão de escoamento, especialmente para os polímeros Pol-02 e Pol-01, pois acima dessa dosagem as vazões de escoamento não demonstram crescimento considerável.

Na análise das características do percolado, verifica-se que o pH encontra-se na faixa de 7,7 a 8,3 e a turbidez apresenta valores inferiores a 50 FAU em dosagens a partir 150 mg/l para os polímeros 01 e 02 (Pol-01 e Pol-02), embora amplamente variável para o polímero 3, conforme ilustram os gráficos da Figura 7.4

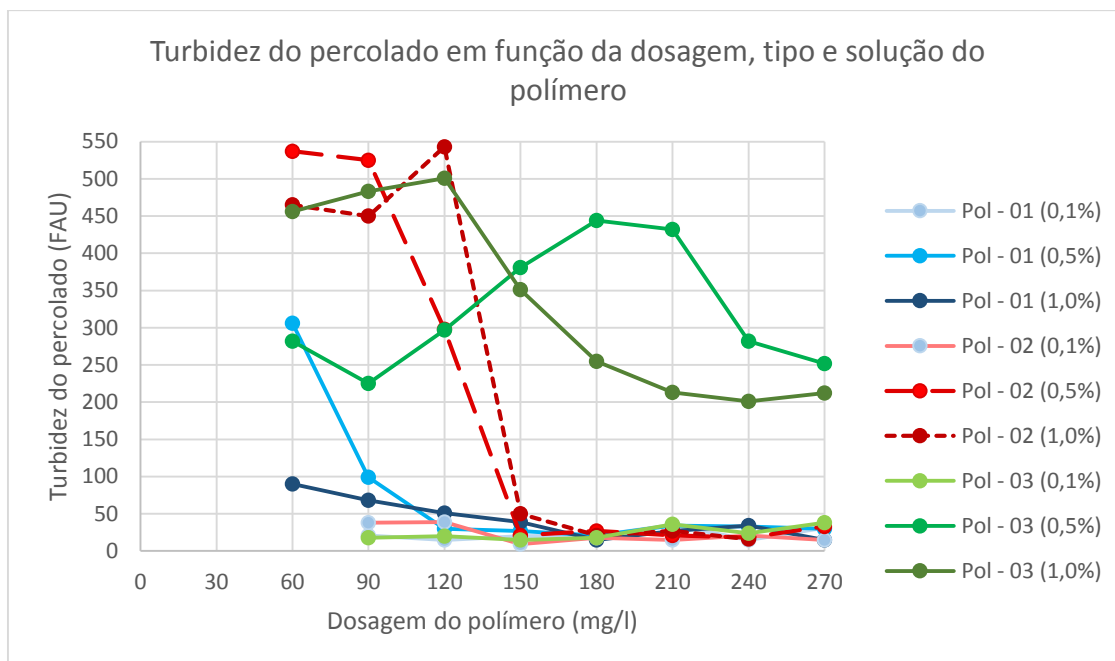


Figura 7.4 - Turbidez do percolado com relação a dosagem e o tipo do polímero para soluções de 0,1%, 0,5% e 1,0%.

Na avaliação conjunta da vazão de desaguamento e turbidez do percolado verifica-se que os 3 polímeros na solução de 0,1 % apresentaram bons desempenhos a partir de 180 mg/l, confirmando os resultados da primeira etapa de ensaios.

No entanto, a solução de 0,5% também demonstra boa performance para dosagem de 180 mg/l nos polímeros 02 e 01 e foi priorizada no refinamento por utilizar 5 vezes menos água de diluição que a solução de 0,1%.

7.2.3. Resultados dos testes de refinamento finais com *Jar test*

Nestes ensaios a mistura foi realizada em *Jar test* seguida da filtração no mini funil. Foram testados os polímeros 01 e 02 na solução de 0,5 % em lama de dragagem com teor de sólido em peso de 10 %, pH de 7,5, massa específica de 1,07 g/cm³ e temperatura ambiente.

Na análise conjunta de vazão e turbidez (Figura 7.5) constata-se que ambos os polímeros (01 e 02) apresentaram bons resultados a partir da dosagem de 180 mg/l, gerando um percolado na vazão de 0,21cm³/s, turbidez menor que 50 FAU e pH aferido entre 8 a 8,3.

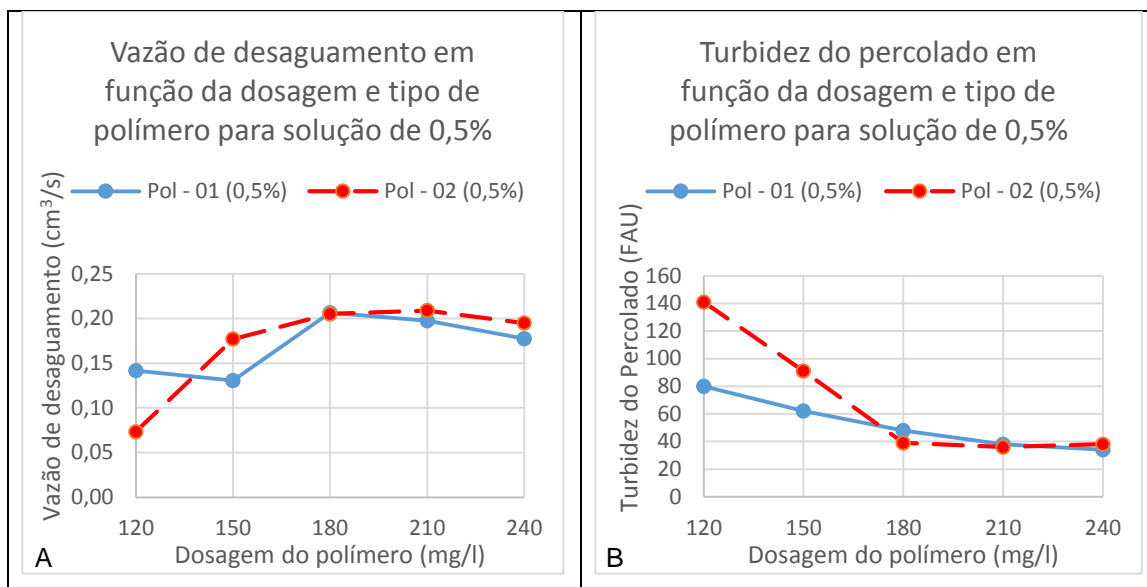


Figura 7.5 - Vazão de desaguamento (A) e turbidez do percolado (B) no processo de *Jar test* seguido do mini funil.

De acordo com a Tabela 5.10, esses dois polímeros apresentam carga reativa muito alta, contudo o pH da solução a 0,5% apresenta-se na faixa de 3,0 a 5,0 para o polímero 01 e 6,0 a 9,0 para o polímero 02. Devido a menor interferência no pH da mistura, optou-se pelo uso do polímero 02 no experimento piloto. Inclusive esse polímero 2 apresenta maior peso molecular corroborando com KHACHAN et al. (2014) ao citarem que poliácridamidas catiônicas (CPAMs) de alto peso molecular permitem a floculação por neutralização de carga e promovem maior taxa de sedimentação.

Desta forma, os testes para condicionamento da lama de dragagem produzida com 10% de sólidos conduziram para utilização de uma solução de 0,5% do polímero 2 (superfloc-8398) numa dosagem de 180 mg/l. Deste modo obteve-se uma eficiência de desaguamento (ED)⁵⁷ de 86,0% e uma eficiência de infiltração (EI)⁵⁸ de 51,5%. Portanto, melhores que as eficiências obtidas com o mesmo polímero e dosagem na solução de 0,1% citada na primeira etapa de ensaios.

Com as equações 5.16 e 5.17 verifica-se um volume de 36 ml de solução polimérica de 0,5% em 1 litro de lama, ou seja, 3,6 ml /100 ml de lama. Tal valor equivale a uma taxa de aproximadamente 1,7 kg de polímero por tonelada de sedimento seco.

⁵⁷ calculada nos moldes de Moo-Young et al. (2002), ver Tabela 3.13.

⁵⁸ calculada de acordo com o modelo de Muthukumaran e Ilamparuthi (2006), ver Tabela 3.13.

Portanto dentro da faixa aceitável de 0,8 a 2,0 kg/ton definida por Vertematti (2015) para lama de dragagem.

Os processos empíricos da mistura com bastão até estabilização visual da reação e os 10 tombos da amostra de um béquer para o outro afim de verificar a permanência do floco requerido no ensaio de mini funil (HUESKER, 2013), bem como a transferência da mistura de um béquer para o outro até a formação dos flocos requerido no ensaio de cone (TENCATE, 2007) e no teste de desaguamento rápido (TENCATE, 2010) tiveram no ensaio de *Jar test* as condições científicas necessárias para a determinação do gradiente de velocidade e tempo de agito suficientes para conferir condições hidrodinâmicas ideais para mistura ótima do polímero.

7.3. PROPRIEDADES REOLÓGICAS DA LAMA PRODUZIDA

A lama produzida com teores de sólidos em peso (TSp) de 5%, 10%, 10% com polímero e 15% foram submetidas ao ensaio de viscosidade no aparelho fann 35 conforme procedimento estabelecido pela Norma PETROBRAS N-2605 (1998).

As especificações de cálculo definidas para o aparelho e citadas por Shiroma (2012) permitiram traçar as curvas de fluxo (Figura 7.6), que indicam características de fluido não newtoniano, por não apresentarem uma relação constante entre a taxa e a tensão de cisalhamento.

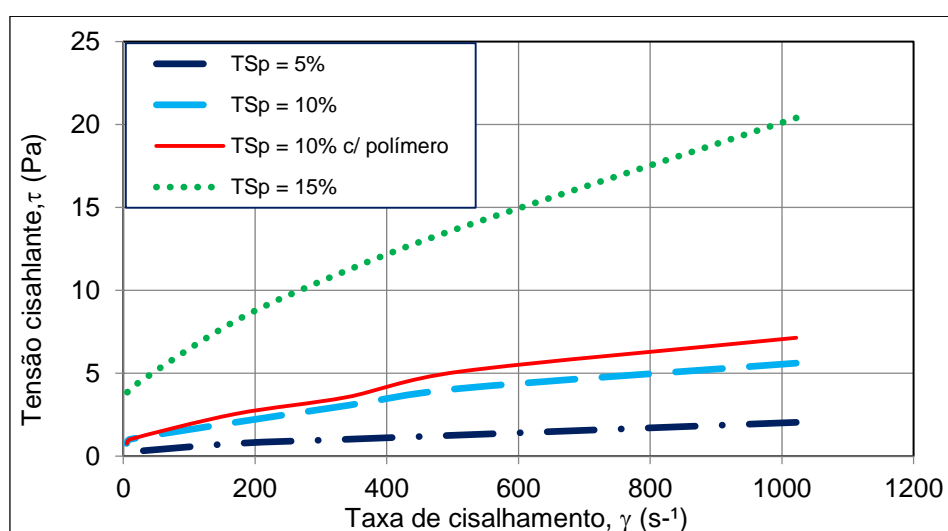


Figura 7.6 - Curvas de fluxo das lamas produzidas com diferentes teores de sólidos em peso

As curvas de fluxo demonstram que quanto maior o teor de sólido na lama, maior a característica de um fluido pseudoplástico com tensão de cisalhamento inicial em modelo próximo ao de Herschell-Buckley (Bingham generalizado). Papenmeier et al.(2013) confirmam esse comportamento pseudoplástico nas lamas fluidas em ambiente estuarino no nordeste do Brasil para concentrações de sólidos abaixo de 300 g/l. (mais que o dobro da lama de dragagem produzida no estudo).

A adequação do modelo reológico numérico que melhor descreve o escoamento da lama de dragagem com TSp de 10% com polímero foi estabelecida a partir da equação gerada pela linha de tendência polinomial com coeficiente de determinação (R^2) de 0,9964 (equação 7.1). Esse coeficiente representa a medida de ajustamento de um modelo estatístico com a regressão linear em relação aos valores observados na curva de fluxo obtida e quanto mais próximo de 1(um) mais representativo o modelo.

$$\tau = 40^{-6} \gamma^2 + 0,01 \gamma + 0,825 \quad 7.1$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento (Pa)

γ = taxa de cisalhamento (S^{-1})

No que se refere as curvas de viscosidade, observa-se na Figura 7.7 que a viscosidade das lamas de 10% de TSP com e sem polímero não apresentam uma diferença significativa, quando comparada a variação existente nas lamas com teor de sólido em peso de 5% e 15%.

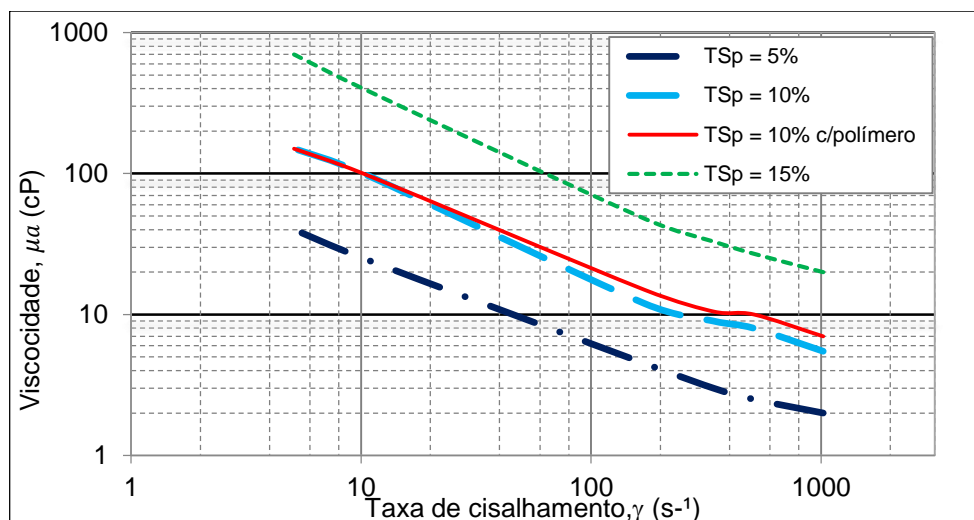


Figura 7.7 - Curvas de viscosidade da lama produzida com diferentes teores de sólidos em peso

Novamente a adequação de modelo reológico numérico que melhor descreve a viscosidade da lama de dragagem com TSp de 10% com polímero foi estabelecida a partir da equação gerada pela linha de tendência potencial com coeficiente de determinação (R^2) de 0,9918, equação 7.2.

$$\mu_a = 383,64 \gamma^{-0,597} \quad 7.2$$

Onde:

μ_a = Viscosidade aparente (cP)

γ = taxa de cisalhamento (S^{-1})

Essas equações juntamente com as condições operacionais de mistura definidas para o ensaio no *Jar test* (tabela 5.11) permitiram determinar uma viscosidade dinâmica aparente de 12,97 cP ($12,9 \times 10^{-3}$ Pa.s) na mistura rápida (coagulação) e de 51,28 cP ($51,28 \times 10^{-3}$ Pa.s) na mistura lenta (floculação). Como era de se esperar, devido à presença de maior teor de sólidos, esses valores encontram-se acima da viscosidade dinâmica da água doce, que equivale a $1,0 \times 10^{-3}$ Pa.s à temperatura de 20°C e pressão atmosférica.

Mesmo sabendo que a viscosidade da lama depende de fatores como temperatura, gradiente de velocidade, teor de sólido e características dos materiais constituintes do fluido, cita-se que, ao considerar a variação da velocidade de corrente, a lama fluida do rio Orinoco, na Venezuela, produz viscosidade com valores de $2,0 \times 10^{-3}$ a 21,0 Pa.s e no estuário de Gironde, na França, a viscosidade da lama fluida alcança 15,0 Pa.s, quando os valores máximos de sólidos atingem 600 g/l (PAPENMEIER et al., 2013).

7.4. MISTURA DA SOLUÇÃO POLIMÉRICA COM A LAMA PRODUZIDA

Além de contribuir com a definição do tipo e dosagem ideal do polímero, o uso do *Jar test* permitiu apurar as condições empíricas da mistura realizada nos ensaios de mini funil e ensaio de cone. Desta forma, parâmetros foram obtidos para que um modelo de cálculo estabelecido permita dimensionar uma estrutura de campo capaz de realizar a mistura de forma mecânica ou hidráulica com desempenho similar ao de laboratório, observando os critérios de semelhança geométrica e dinâmica conforme modelos descritos por McCabe, Smith & Harriott (1993) e Nunes (2001).

A partir das condições operacionais utilizadas no aparelho de *Jar test* aliadas as características do fluido foi possível mensurar as viscosidades e as potências presentes no agito de coagulação e de floculação, conforme se observa na Tabela 7.3.

Tabela 7.3 – Parâmetros de mistura da lama definidos nos ensaios de *Jar test*

	Mistura rápida (Coagulação)	Mistura lenta (Floculação)	Método/forma de obtenção
Tempo de agitação(t) (s)	30	600	Tabela 5.11
Rotações (rpm)	200	40	Tabela 5.11
Taxa de rotação (N) (rps)	3,3	0,7	Rotações/60 seg
Gradiente de velocidade (G) (s ⁻¹)	291	29,1	Ábaco do <i>Jar test</i>
Taxa de cisalhamento (Y) (s ⁻¹)	291	29,1	Y = G
Tensão de cisalhamento (t) (Pa)	3,74	1,12	(Equação 6.1)
Viscosidade aparente (μa) (cP)	12,97	51,28	(Equação 6.2)
Viscosidade aparente (μa) (Pa.s)	0,01297	0,05128	1Pa.s = 10 ³ cP = 1kg/(m.s)
Viscosidade aparente (μa) (kgf.s/m ²)	0,00132	0,00523	1kgf.s/m ² = 9,8x10 ⁻³ cP
Viscosidade cinemática (ν) (m ² /s)	1,2 x 10 ⁻⁵	4,8 x 10 ⁻⁵	Visc. Din./dens. fluido
Potência Nominal (P _N) (watts)	2,20	8,7 x 10 ⁻⁰²	(Equação 5.13)
Potência Nominal (P _N) (HP)	2,95 x 10 ⁻⁰³	1,17 x 10 ⁻⁰⁴	(Equação 5.15)
Potência Instalada (P _I) (HP)	5,53 x 10 ⁻⁰³	2,19 x 10 ⁻⁰⁴	(Nunes, 2001)
Intensidade de agitação (HP/m ³)	2,76	0,11	Potência/volume
Número de Reynolds (N _{Re})	15.167,92	767,28	(Equação 5.15)
Número de Camp (N _c)	8.730	17.460	Grad. Veloc. x tempo

7.4.1. Parâmetros de dimensionamento para mistura mecânica

A mistura de dois litros da lama com polímero no *Jar test* permitiu mensurar que a mistura mecânica ocorreu com uma potência instalada de 3,53 x 10⁻³ HP para o processo de coagulação e reduzida para 2,19 x 10⁻⁴ HP na floculação.

De acordo com Nunes (2001), essas potências de instalação consideram o acréscimo de 50% de forma que o motor trabalhe a 80% da potência nominal utilizada efetivamente para provocar o gradiente de velocidade e permitir o choque de partículas promovendo a coagulação e floculação.

Essa possibilidade de choque das partículas é representada pelo número de camp (N_c), produto entre o gradiente de velocidade e o tempo de agitação, que apresentou-se na ordem de 17.460 para uma floculação ótima. Bhatia e Satyamurthy (2009) ao trabalharem o condicionamento da lama siltosa com polímero obtiveram valor semelhante com número de camp de 15.000.

Dentre os parâmetros básicos para o dimensionamento de unidades mecânicas de mistura rápida e lenta, tem-se a manutenção da intensidade de agitação definida no *Jar test* em 2,76 HP/m³ para coagulação e 0,11 HP/m³ para floculação. Esses valores representam uma mudança do grau de agitação de muito forte à suave, conforme escala citada por McCabe; Smith; Harriott (1993).

Embora a mistura mecânica em campo seja usual apenas no processo de preparo da solução polimérica em reservatório com misturador vertical e nas raras condições de floculação em tanques para enchimento do tubo geotêxtil com funil, os parâmetros obtidos na Tabela 7.3 fornecem características da dinâmica de mistura para diretrizes de projeto.

Assim, os parâmetros obtidos permitem determinar as curvas de potência instalada em função do volume de lama a ser agitada de forma rápida e lenta, conforme exemplificado na Figura 7.8.

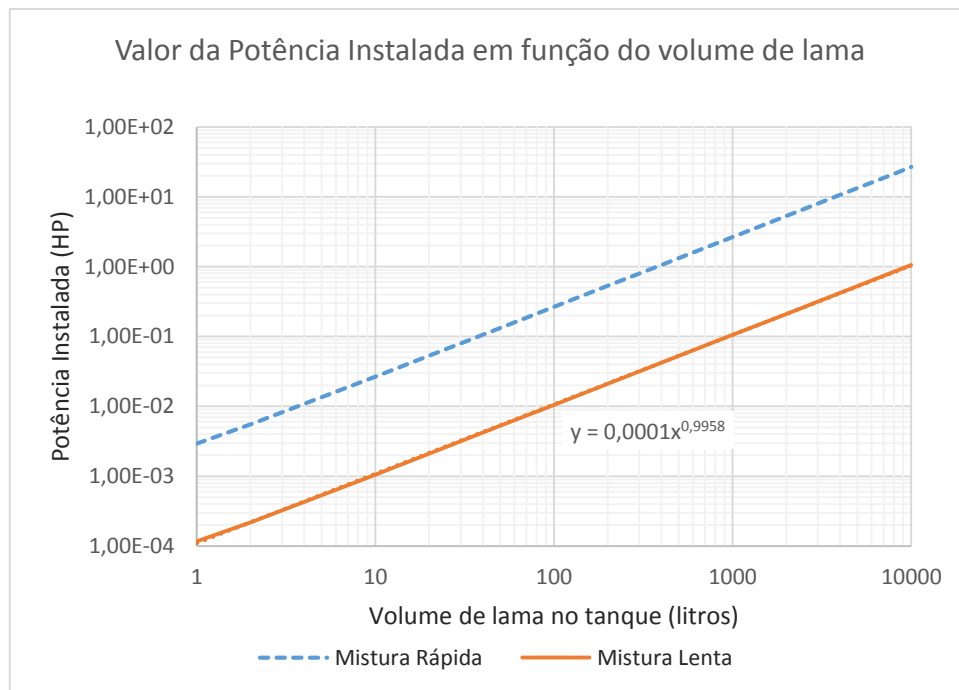


Figura 7.8 - Valor de potência instalada para agitação (rápida e lenta) da lama em função do volume e de condições apuradas no *Jar test*

Os aspectos geométricos do ensaio com o *Jar test* também contribuem com parâmetros para o projeto de mistura na escala de campo. Critérios relatados por McCabe, Smith & Harriott (1993) permitem dimensionamento do tanque e do impelidor tipo pá de duas laminas em função do volume de lama, conforme exemplificado na Figura 7.9.

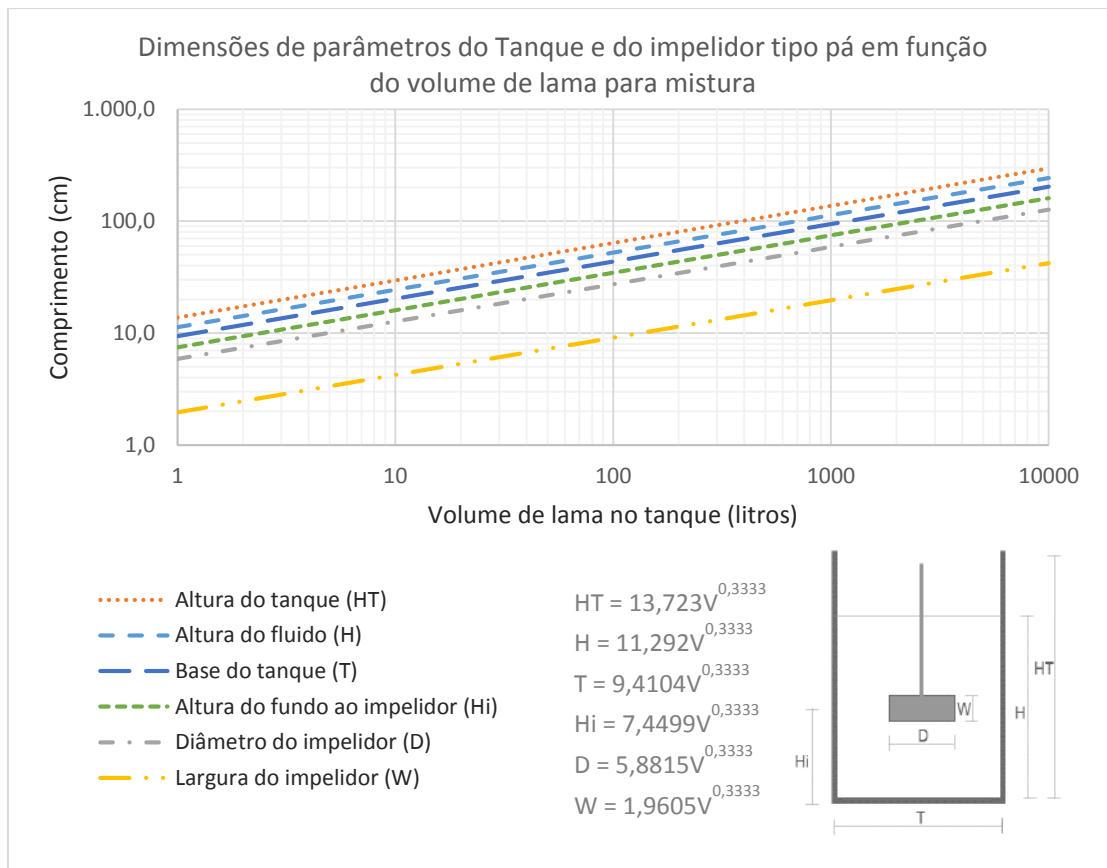


Figura 7.9 - Dimensões de parâmetros do tanque e do impelidor tipo pá em função do volume de lama e de condições apuradas no *Jar test*

Embora tenha sido apresentado elementos de ampliação da escala para mistura de fluxo radial com impelidor de pás giratórias planas de duas lamina no eixo central vertical, similar ao do aparelho de *Jar test*, outros modelos e tipos de impelidores de campo podem ser adotados e escolhidos com base na aplicação dos conceitos de mecânica dos fluidos sobre os parâmetros obtidos na aplicação do *Jar test* para a mistura adequada.

Considerando que o experimento contempla a fabricação da lama em reservatório de 200 litros, um misturador com dimensões próximas a estabelecida pelo gráfico da Figura 7.9 foi acionado com rotações proporcionais as definidas no *Jar test*. Este procedimento permitiu a formação de flocos na faixa de 3 mm.

7.4.2. Parâmetros de dimensionamento para mistura hidráulica

Considerando que no processo hidráulico a mistura ocorre devido a turbulência do fluido gerada pela perda de carga (h_f), apropriou-se dos valores de viscosidade cinemática (ν), tempo de retenção (t), gradiente de velocidade (G) e aceleração da

gravidade (g) para calcular, por meio da equação 5.20, as perdas de cargas correspondentes as misturas de coagulação e de floculação no ensaio de *Jar test*.

Assim, a perda de carga de 3,14 metros corresponde a turbulência necessária para coagulação de um volume de $0,002 \text{ m}^3$ de lama em um tempo de retenção de 30 segundos, enquanto que uma perda de carga de 2,48 metros gera uma turbulência para floculação do mesmo volume em um período de 600 segundos.

Para dimensionamento hidráulico da estrutura de coagulação e floculação no campo, critérios como a vazão de enchimento, o tipo e diâmetro da tubulação, aliados as informações de mistura: gradiente de velocidade e tempo de retenção/agito, permitem determinar a velocidade do fluido, a perda de carga e a configuração de chicanas para uma mistura adequada.

Embora o experimento tenha utilizado enchimento hidráulico com bombeamento da lama para o sistema geotêxtil fechado, a lama continuou sendo preparada e misturada em recipientes de 200 litros, portanto não foram utilizadas chicanas misturadoras constituída de tubulação com curvas, sistema conhecido como floculação em linha, amplamente utilizado em campo.

No entanto para dimensionamento do sistema de mistura hidráulica com chicanas é importante observar que a velocidade do fluido na tubulação seja superior a $0,3 \text{ m/s}$ para não permitir sedimentação de partículas de areia durante o fluxo. Outros parâmetros, como a vazão de enchimento, diâmetro da tubulação e tempo de agito devem ser equacionados de forma que o volume a se aplicar a perda de carga necessária para a mistura ideal seja reduzido, evitando de longos metros de chicana.

7.5. CONCLUSÕES PARCIAIS

O preparo da lama de dragagem representativa e os testes de condicionamento com polímero para melhorar a eficiência do desaguamento em sistema geotextil fechado permitiram constatar que:

- A lama de dragagem representativa com 10% de sólidos em peso é composta por aproximadamente 110 g de sedimento seco por litro de água da lagoa da Tijuca, o que representa uma suspensão intermediária (50g/l a 210g/l), entre a diluída e a concentrada. Essa lama apresenta densidade média de $1,07 \pm 0,02$ e teor de sólidos em volume na ordem de 4%;
- Os testes para condicionamento da lama conduziram para utilização de uma solução de 0,5% de polímero de poliacrilamida catiônica, e uma dosagem de 1,7 kg de polímero por tonelada de sedimento seco, o que equivalente a 180 mg/l;
- Os ensaios de mini funil se mostraram eficientes na determinação da dosagem do polímero, mas devem ser complementados com o *Jar test* para a determinação das condições operacionais da mistura, como o gradiente de velocidade e o tempo de agito. Esses parâmetros, em conjunto com a viscosidade do fluido, são fundamentais para o dimensionamento mecânico ou hidráulico da mistura, cujos elementos de cálculos foram indicados nesse trabalho.

8. COMPORTAMENTO DA DISPOSIÇÃO DE SEDIMENTO DE DRAGAGEM EM SISTEMA GEOTÊXTIL FECHADO

8.1. COMPORTAMENTO MECÂNICO DO SISTEMA GEOTÊXTIL FECHADO

O experimento do processo de enchimento e desaguamento em sistema geotêxtil fechado (SGF) baseou-se no padrão estabelecido pela norma americana (ASTM D7880M: 2013) e foi realizado em 09 (nove) bolsas geotêxteis de 53 x 53 cm e capacidade de 28,32 litros. Dois desses experimentos foram desconsiderados devido a falhas no processo, ou seja:

- No SGF 02 ocorreu, durante o enchimento, um vazamento de lama no bocal de entrada na bolsa geotêxtil pois o adaptador de PVC não estava devidamente enroscado.
- No SGF 03 ocorreu, durante o desaguamento, um deslocamento do recipiente plástico de retenção do percolado, permitindo perda desse material.

8.1.1. Atributos de forma e resistência do sistema

Para definição de forma e determinação da altura do sistema e sua variação, recorreu-se as orientações de Leshchinsky, Ling, e Gilbert (1996) e Pilarczyk (2000) citados no capítulo 3.

Assim, a elipse formada pelo SGF de perímetro igual a 1,06 m tem uma altura máxima de enchimento prevista para 23,8 cm. Ao considerar que ao final do primeiro ciclo de desaguamento pretende-se obter uma torta com umidade de 250%, pode-se prever um recalque de 17,2 cm, atingindo uma torta com altura final de 6,6 cm, cujas etapas desse ciclo se visualizam na Figura 8.1.

O dimensionamento efetuado para verificação da pressão máxima de enchimento admissível, em função da resistência do sistema, foi realizado com base na proposta de Kazimierowicz (1994) constante no capítulo 3 e utilizando a tração máxima de 50% da tração do tecido geotêxtil, devido as orientações de Ortiz et al. (2003) que enfatiza a fragilidade nas costuras. Desta forma, obteve-se a pressão máxima no enchimento

bombeado na ordem de 400 kPa (efeito do modelo reduzido, considerando o mesmo geotêxtil da escala real). Alerta-se que em situações de campo a pressão de enchimento na boca de entrada costuma variar de 5 a 10 kPa e não deve ser superior a 34,5kPa, sob pena de rompimento.

Tendo em vista que no enchimento manual foi adotado a pressão de 8 kPa, estabelecida pela norma americana em função da altura do tubo de enchimento até o bocal de entrada da bolsa geotêxtil, essa mesma pressão foi adotada para os enchimentos bombeados e alcançou 10 kPa apenas no último sistema geotêxtil fechado (SGF 09).

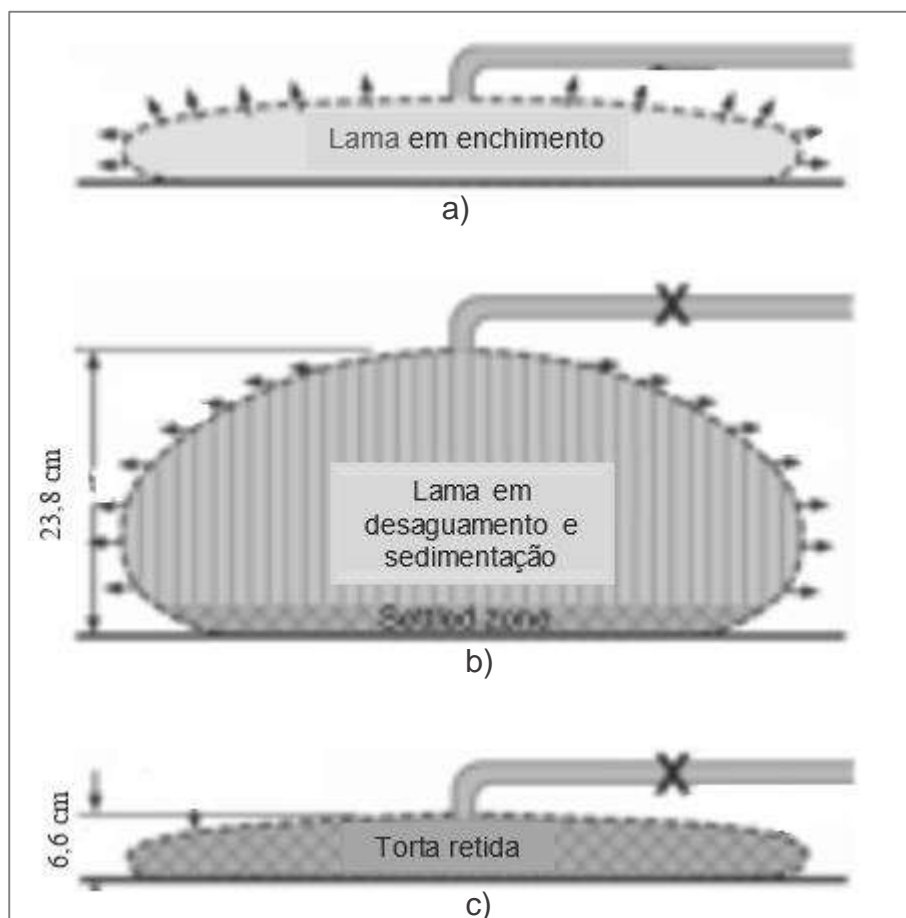


Figura 8.1 – Etapas do primeiro ciclo de enchimento e desaguamento do SGF: a) lama em enchimento; b) lama em desaguamento e sedimentação; c) torta retida.

8.1.2. Critérios mecânicos do processo de enchimento e desaguamento

Embora não seja objetivo principal deste trabalho o estudo mecânico do processo de enchimento e desaguamento, o monitoramento do peso das lamas utilizadas em cada ciclo do sistema SFG e seus respectivos percolados permitiram determinar o peso da torta retida em cada ciclo de enchimento do SFG's, obtendo-se curvas do peso da torta retida em função do tempo.

Na Figura 8.2 encontram-se as curvas representativas do enchimento manual para os 05 ciclos do SFG 04. Observa-se que em cada ciclo ocorre uma tendência à estabilização do peso da torta retida em função do tempo de desaguamento, é neste instante que novo ciclo de enchimento deve ser realizado. Ao final de cada ciclo constata-se um incremento no peso da torta retida, destacando que esse incremento é decrescente até alcançar o volume máximo estabelecido para o SFG. No caso do SFG 04 expresso no gráfico verifica-se que ao final dos cinco ciclos foram retidos cerca de 43 kg de torta e redução aproximada de 65% do volume de lama utilizada nos cinco ciclos.

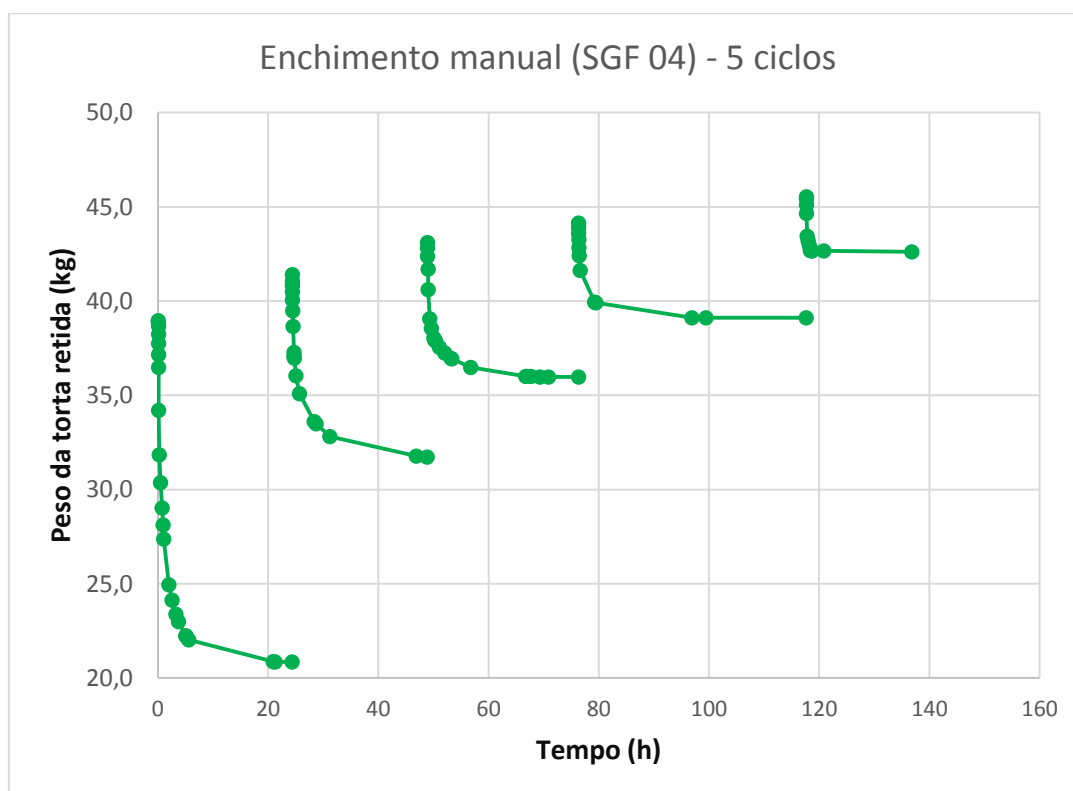


Figura 8.2 – Peso da torta retida em cada ciclo de enchimento manual (SGF 04)

As curvas representativas do enchimento bombeado são exibidas na Figura 8.3 que apresenta os 05 ciclos do SFG 08. Observa-se, como no enchimento manual, a mesma tendência de estabilização do peso da torta retida com o tempo de desaguardamento, porém considerando que no enchimento bombeado a lama era introduzida continuamente pelo período de 1 hora na pressão de aproximadamente 8,0 kPa, observou-se que o peso da torta retida ao final de todo o processo foi de aproximadamente 47,5 kg e uma redução de 63% do volume de lama bombeada.

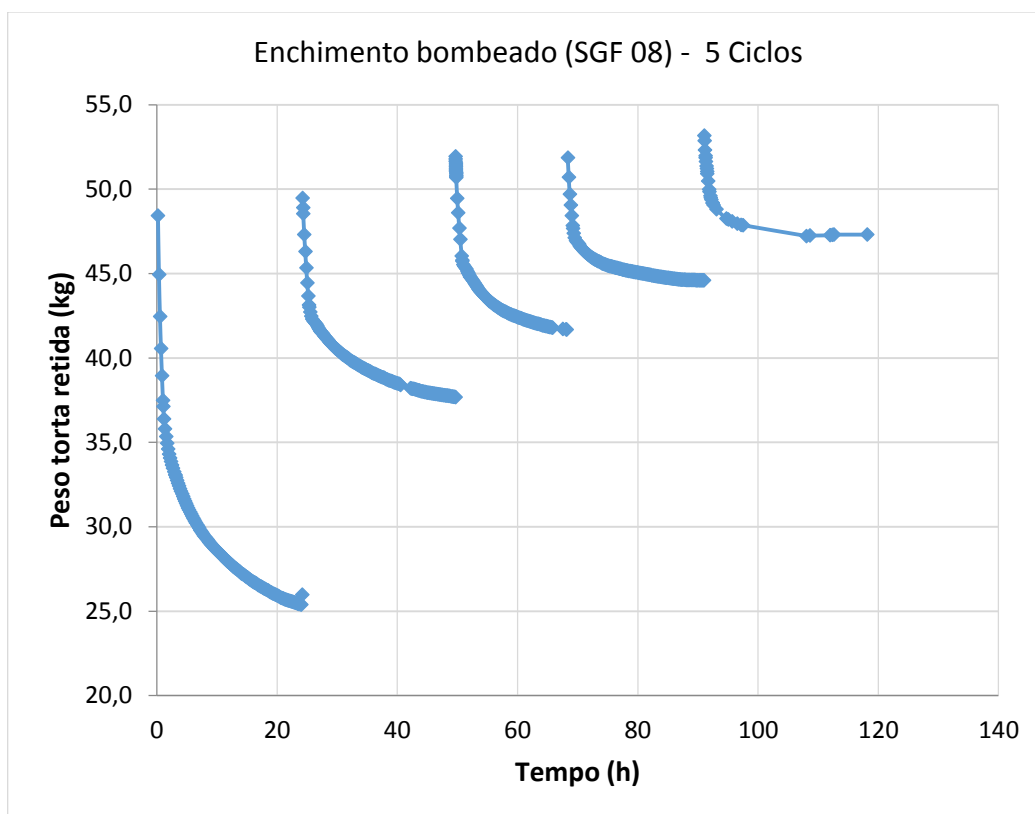


Figura 8.3 – Peso da torta retida em cada ciclo de enchimento bombeado (SGF 08)

Durante a operação em campo costuma-se limitar o enchimento até a altura máxima prevista em projeto, que no experimento foi calculada em 23,8 cm como visto anteriormente. Outra forma de controlar o processo é limitar a pressão de entrada no SGF. Os dois critérios estão relacionados à etapa de enchimento do ciclo. Porém, para controle da etapa de desaguardamento, um bom indicador é a altura da torta ao final de cada ciclo.

As alturas da torta ao final dos ciclos para o enchimento manual e bombeado podem ser observadas na Figura 8.4, que inclusive comprova o recalque previsto no primeiro ciclo, demonstrando altura da torta próxima de 6,6 cm calculado anteriormente para a umidade de 250%.

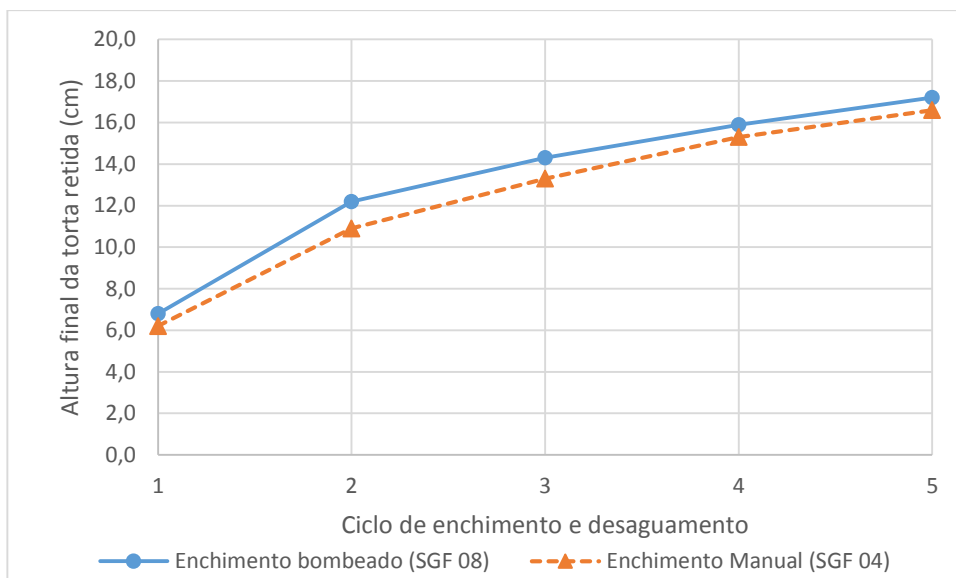


Figura 8.4 – Alturas das tortas retidas com enchimento manual e bombeado por ciclo

Outro interessante critério a se observar no processo de desaguamento é a taxa de fluxo do percolado que, no modelo reduzido, inicialmente se apresentou na ordem de 2,8 litros/min/m² para o enchimento manual e 1,2 litros/min/m² para o enchimento bombeado, comprovando a ineficiência da floculação no segundo caso. Essas taxas, em geral, foram diminuindo nos ciclos seguintes e esse fato pode ser creditado ao efeito do *filter cake* em formação.

8.2. COMPORTAMENTO AMBIENTAL DO PERCOLADO GERADO

O processo de desaguamento em sistema geotêxtil fechado sob o ponto de vista da qualidade do percolado gerado foi analisada com base nos parâmetros a seguir discutidos.

8.2.1. Sólidos Totais e Sólidos Suspensos

Na verificação das características dos sólidos totais (ST), as lamas produzidas demonstraram valores médios entre 87.162,0 mg/l e 108.613,0 mg/l. O sistema geotêxtil fechado permitiu uma redução desses valores, apresentando percolados com sólidos totais na faixa de 6.238,0 a 36.017,0 mg/l. A eficiência mínima na redução de sólidos totais foi de 88,7% para o processo de enchimento manual (SGF 01 a 06) e de 65,6% para enchimento com bombeamento (SGF 07 a 09), conforme se verifica na Figura 8.5.

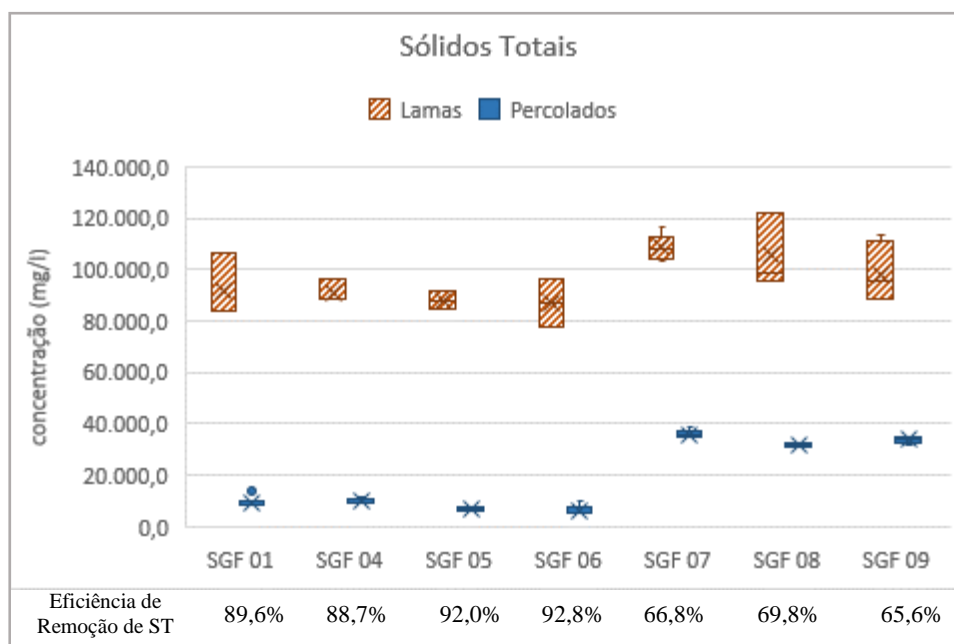


Figura 8.5 - Concentração de sólidos totais nas lamas e nos percolados finais de cada ciclo de desaguamento, com a eficiência de remoção correspondente por SGF.

Quando efetuada análise de variância (ANOVA) no procedimento de comparação de Tukey (Figura 8.6), verifica-se que as lamas não apresentam variação significativa de sólidos totais. Nos percolados, entretanto, foi constatada variação significativa entre os gerados em SGF com enchimento manual (SGF 01, 04, 05 e 06) dos gerados em SGF com enchimento bombeado (SGF 07, 08 e 09).

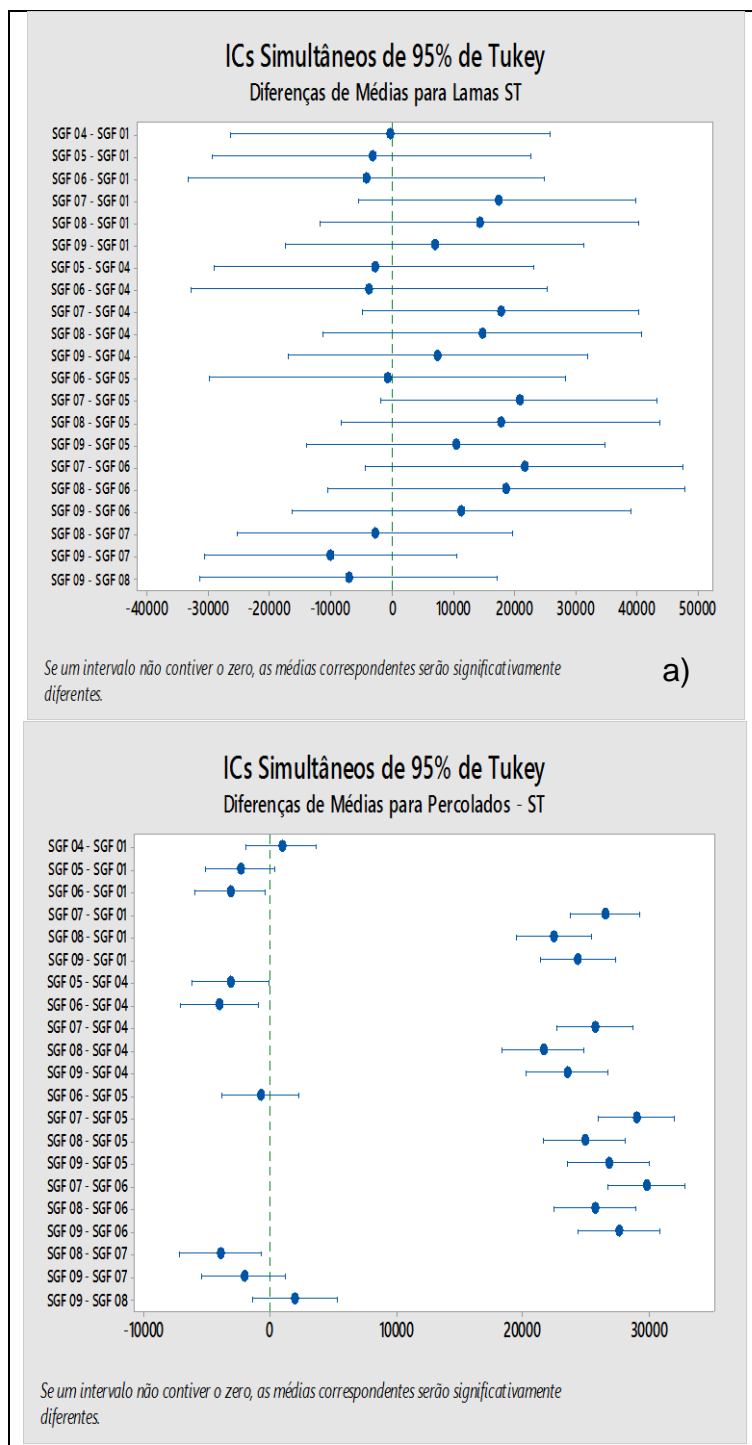


Figura 8.6 – Análise de variância da concentração de sólidos totais a) nas lamas e b) nos percolados de cada SGF, pela comparação de Tukey.

Quando se trata de remoção apenas dos sólidos suspensos (SS), a eficiência aumenta para valores superiores a 98,7%, com melhores resultados no enchimento manual (SGF 01 a 06) conforme se observa na Figura 8.7.

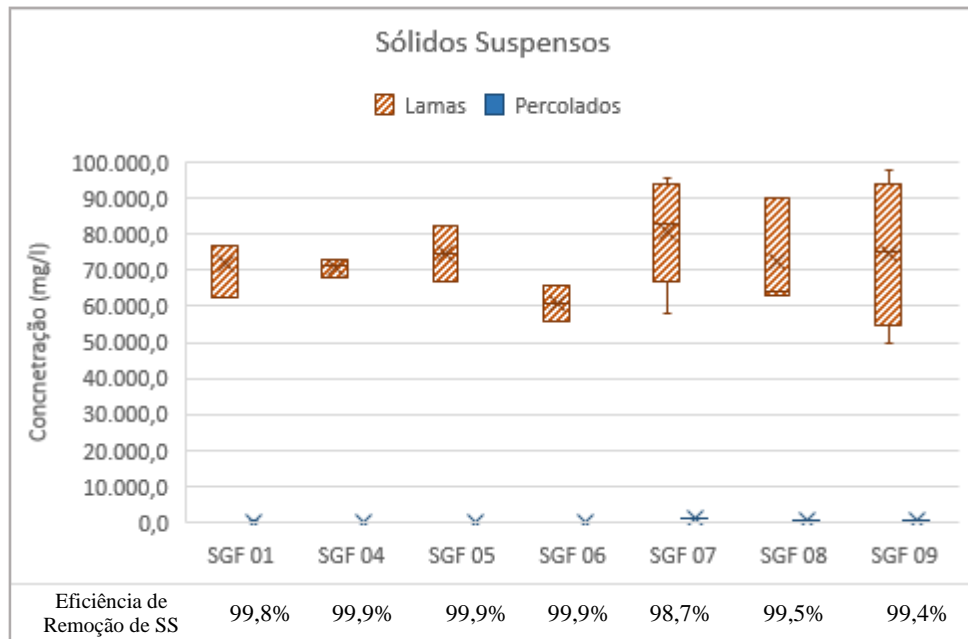


Figura 8.7 - Concentração de sólidos suspensos nas lamas e nos percolados finais de cada ciclo de desaguamento, com a eficiência de remoção correspondente por SGF

Na observância por ciclo de desaguamento (Figura 8.8), a concentração de sólido suspenso no percolado apresenta-se mais elevada no primeiro ciclo, quando o *filter cake* ainda encontra-se em formação.

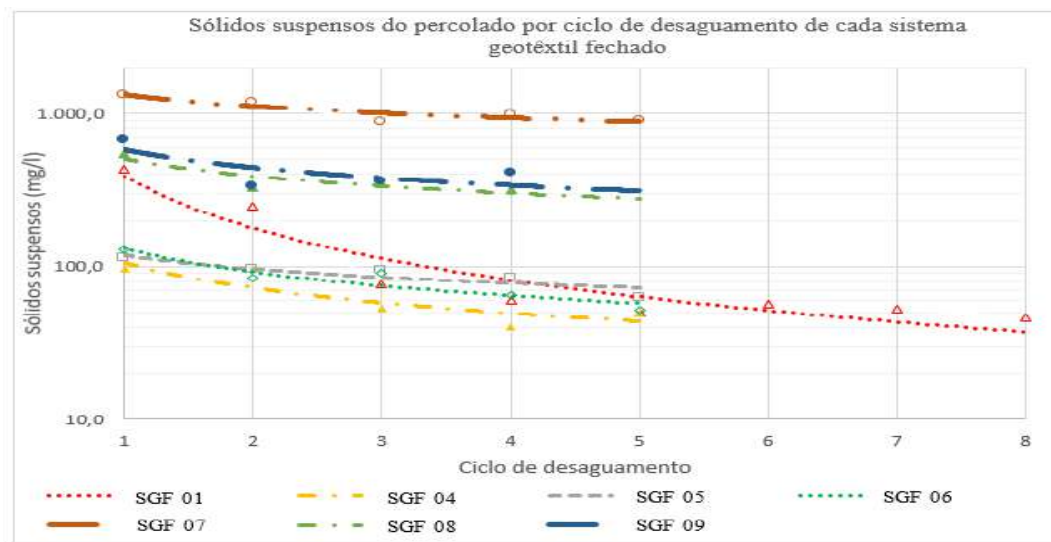


Figura 8.8 - Concentração de sólidos suspensos nos percolados finais de cada ciclo de desaguamento dos SGFs

De acordo com as linhas de tendência constantes no gráfico esse valor tende a atenuar nos ciclos seguintes independentemente da forma de enchimento do SGF. Tal fato pode ser justificado pela formação cada vez mais espessa do *filter cake* que contribui com a retenção de partículas.

Constata-se ainda na Figura 8.8 que o enchimento bombeado da lama sem polímero (SGF 07) gerou percolado com concentrações de sólidos suspensos superiores a 900 mg/l, enquanto que o enchimento manual da lama com polímero (SGF 04, 05 e 06) apresentou melhores resultados, atingindo valores inferiores a 90 mg/l a partir do 3º ciclo de enchimento.

A legislação que dispõe sobre padrões de lançamento de efluentes (resolução nº 430/11 do CONAMA) não estabelece limite de sólidos suspensos, embora indique que os materiais sedimentáveis devem apresentar até 1 ml/l em teste de 1 hora em cone Imhoff. Entretanto, não se observou esse parâmetro no presente estudo.

Ao aplicar os indicadores, que se baseiam nos sólidos, utilizados para verificação da eficiência do processo de desaguamento em sistema geotêxtil fechado, ou seja: eficiência de filtração (Moo-Young e Trucker, 2002; Liao e Bhatia, 2006) e Sólidos passantes (Bhatia, 2009; Tominaga, 2010) citados no capítulo 3, constata-se que a eficiência de filtração equivale a eficiência de remoção dos sólidos totais e variou de 65,6 a 92,8% conforme citado anteriormente na Figura 8.5.

No caso do indicador de sólidos passantes, que relaciona o percentual dos sólidos totais do percolado com relação aos sólidos totais da lama, os valores variam de 7,2 a 34,4%, correspondendo a complementação dos indicadores de eficiência de filtração.

8.2.2. Turbidez

Vale recordar que para cada ciclo de enchimento a turbidez foi monitorada em oito momentos para os percolados provenientes de enchimento manual e em três para os percolados provenientes de enchimento bombeado, conforme consta nos materiais e métodos.

A turbidez do percolado, que está diretamente relacionada aos sólidos suspensos, indicou, em geral, valores mais elevados no primeiro ciclo de enchimento de cada SGF, conforme se observa na Figura 8.9.

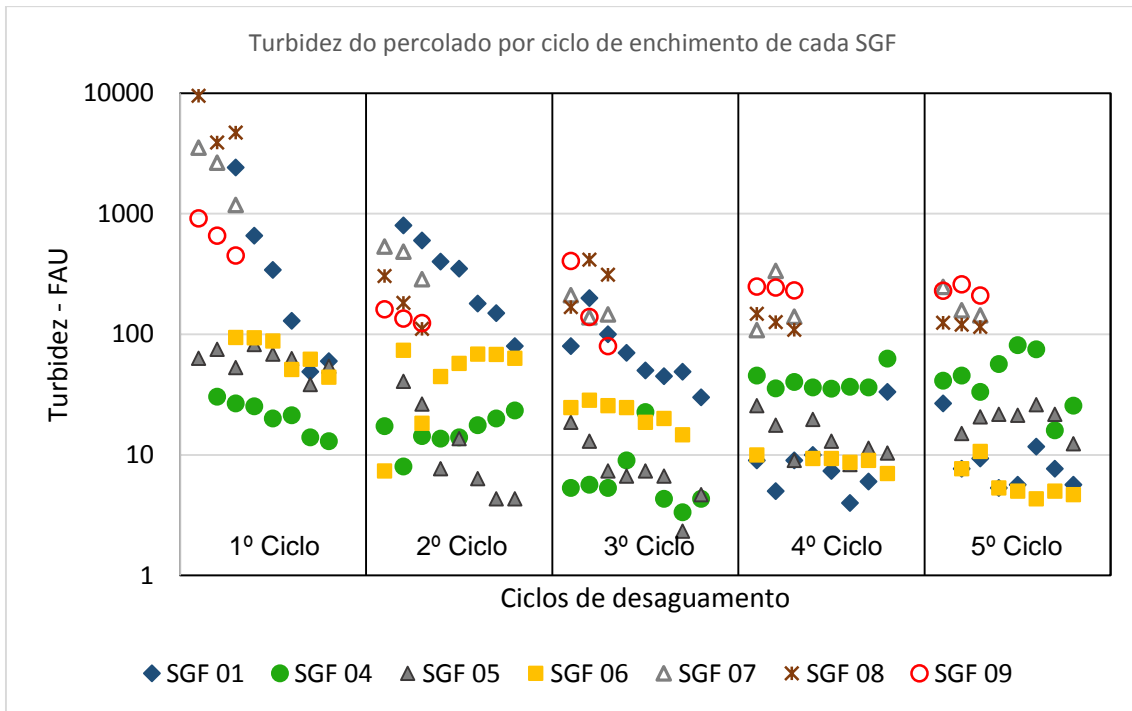


Figura 8.9 - Turbidez nos percolados em vários instantes de cada ciclo de desaguamento dos SGFs

Da Figura 8.9 observa-se ainda que os percolados provenientes dos SGFs com enchimento bombeado (SGF 07 a 09) apresentaram turbidez acima de 100 FAU em todos os ciclos, enquanto que os de enchimento manual com polímero (SGF 04 a 06) geraram percolados inferiores a 100 FAU desde o primeiro ciclo e chegaram a atingir turbidez menores que 10 FAU na sequência de desaguamento (Figura 8.10).

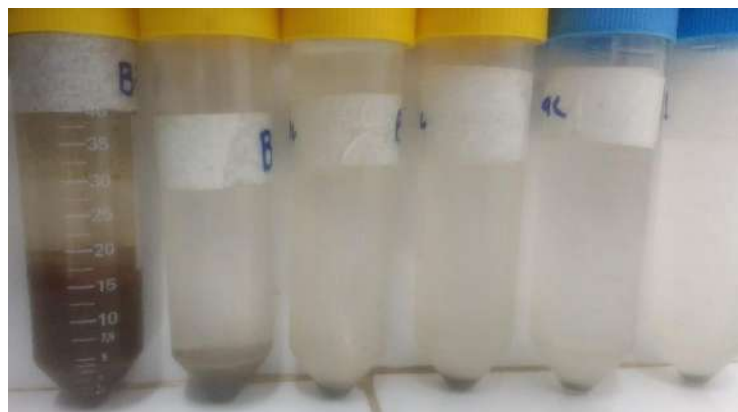


Figura 8.10 – Lama e sequência de percolados por ciclos de desaguamento

8.2.3. Nutrientes (Fósforo e Nitrogênio)

O Fósforo e o Nitrogênio são nutrientes cujo aumento da concentração nos ecossistemas aquáticos pode promover a proliferação de algas e a eutrofização.

Isso posto, as lamas produzidas para enchimento dos SGFs apresentaram Fósforo total médio entre $11,6 \pm 2,6$ mg/l e $27,4 \pm 4,5$ mg/l, conforme se observa na Figura 8.11. A título de referência o esgoto bruto apresenta concentração de Fósforo total típica de 14,0 mg/l (Von Sperling, 2005).

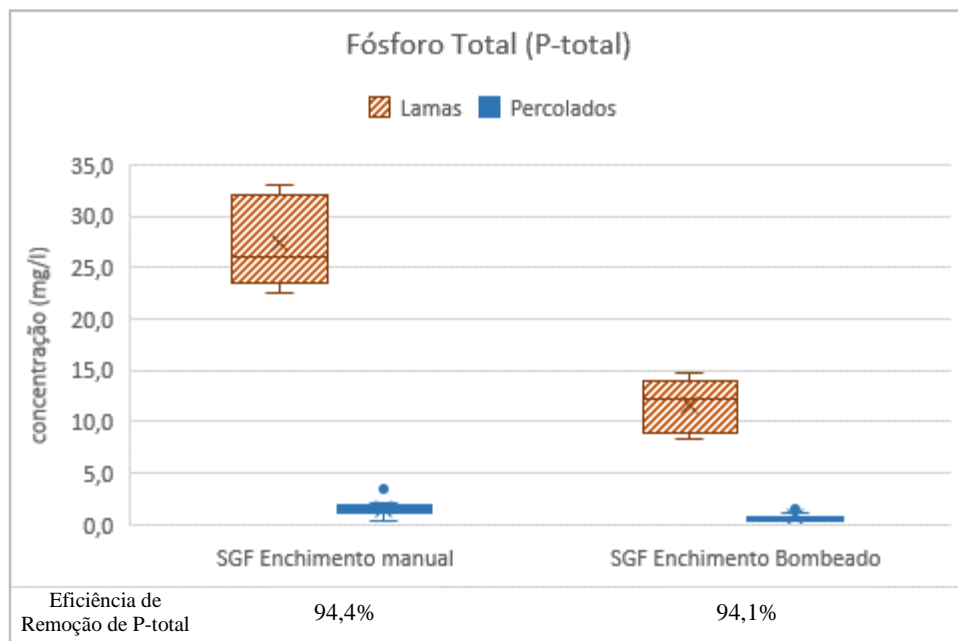


Figura 8.11 – Distribuição da concentração de Fósforo Total (P-total) nas amostras de Lama e de Percolado, para SGF com enchimento manual e com enchimento bombeado.

A diferença entre a concentração de Fósforo total entre as lamas utilizadas para enchimento manual do SGF e as lamas utilizadas para enchimento bombeado está inversamente relacionada a salinidade representada pela capacidade elétrica específica de cada lama (CEE). Em outras palavras, a condutividade elétrica específica elevada na lama produzida para enchimento por bombeamento (SGF 07, 08 e 09) pode ter provocado uma precipitação química que reduziu a concentração de Fósforo total. Tal pressuposto baseia-se no fato de que a remoção de Fósforo em efluentes tem sido realizada pela adição de sais de ferro (cloreto de ferro) ou alumínio (sulfato de alumínio).

Na Figura 8.11 pode-se observar ainda que os percolados gerados nos SGFs de enchimento manual apresentam P-total médio de $1,5 \pm 0,7$ mg/l, enquanto os gerados pelos SGFs de enchimento bombeado indicam P-total de $0,7 \pm 0,3$ mg/l. Contudo, ambos os sistemas apresentam percentual de redução de P-total superior a 94%.

Numa análise mais detalhada dos percolados gerados pelos processos de desaguamento nos SGFs percebe-se uma tendência de redução da concentração de Fósforo total a cada ciclo de desaguamento. A partir do quinto ciclo obteve-se percolados com valores de P-total inferiores a 1,2 mg/l em todos os sistemas geotêxteis fechados do experimento, conforme verifica-se nas linhas de tendência projetadas na Figura 8.12.

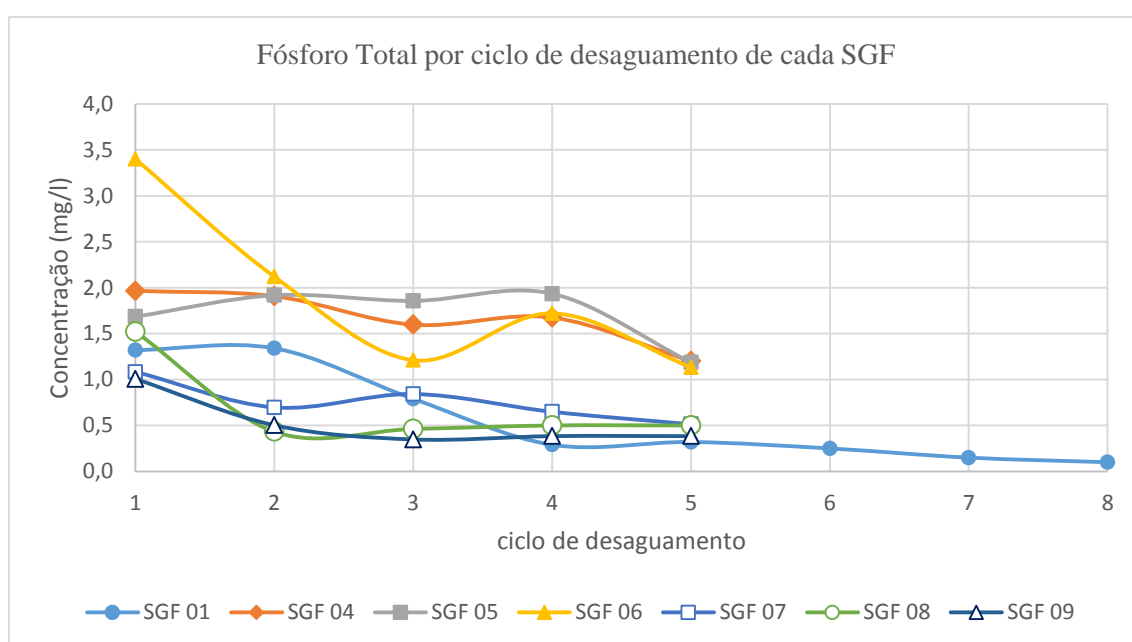


Figura 8.12 – Linhas de tendência da concentração de Fósforo Total (P-total) considerando os ciclos de desaguamento de cada SGF.

A Figura 8.12 ilustra também que os sistemas de enchimento manual com polímero (SGF 04, 05 e 06) apresentaram percolados com concentrações mais elevadas de Fósforo total que percolados proveniente dos sistemas com enchimento bombeado (SGF 06, 08 e 09), onde a condutividade elétrica específica é maior.

Os SGFs de enchimento manual com polímero (SGF 04, 05 e 06) apresentaram percolados com valores de P-total ligeiramente superiores aos detectados na água da lagoa da Tijuca (0,25 a 0,71 mg/l). Lembrando que a própria água da lagoa Tijuca possui concentração de P-total acima do valor da referência de 0,186 mg/l estabelecido pela resolução nº 357/05 do CONAMA para a classe na qual o corpo hídrico foi enquadrado;

e que não há determinação de valor máximo de lançamento de efluente para esses parâmetros na resolução nº 430/11 do CONAMA que rege sobre esse assunto.

Monteiro e Marques (2014), ao relatarem os dados de monitoramento do percolado gerado no sistema geotêxtil fechado utilizado nas obras de dragagem do Canal do Fundão, indicam uma concentração de Fósforo total entre 1,4 e 3,8 mg/l, portanto acima dos valores detectados neste experimento para enchimento bombeado.

O nitrogênio pode ser encontrado como Nitrogênio orgânico (N-org); Nitrogênio amoniacal (ionizada – NH_4^+ e não ionizada – NH_3); Nitrito (NO_2^-); Nitrato (NO_3^-) e em condição molecular (N_2) escapando para atmosfera. Essas transformações, que representam o ciclo do nitrogênio, indicam etapas de degradação, decomposição e recuperação, ocorridas devido a processos de mineralização, equilíbrio químico, nitrificação, desnitrificação e outros identificados na Figura 8.13.

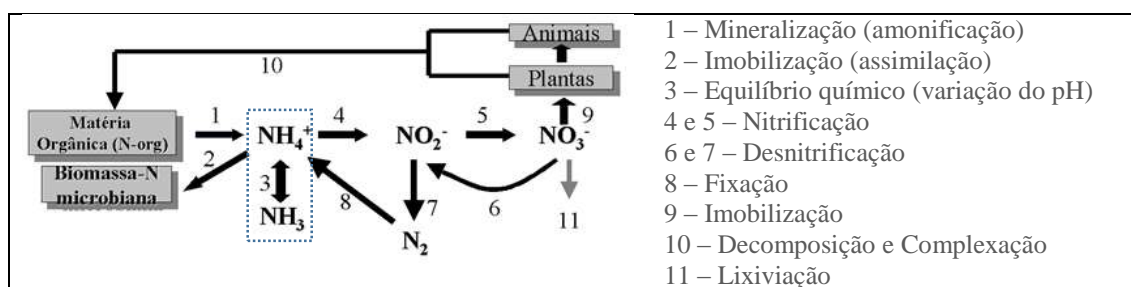


Figura 8.13 – Processos e transformações do Nitrogênio a partir de Von Sperling, 2005.

O nitrogênio amoniacal, gerado como produto primário da degradação de material orgânico, tem sido um bom indicador de poluição da água por ter parte da origem na excreção dos seres vivos. No esgoto bruto esse parâmetro apresenta concentração típica de 30,0 mg/l (NUVOLARI et al., 2003) e o valor máximo de 20,0 mg/l é estabelecido pela resolução nº 430/11 do CONAMA como limite para lançamento de efluentes.

Isto posto, as análises realizadas nas lamas produzidas indicaram nitrogênio amoniacal com valor médio de $22,3 \pm 6,7$ mg/l para o enchimento manual e $16,8 \pm 6,5$ mg/l para o enchimento bombeado. Os percolados gerados por essas lamas tiveram valor médio de $9,6 \pm 3,9$ mg/l e $7,6 \pm 2,8$ mg/l, respectivamente, conforme ilustrado em boxplot na Figura 8.14.

De acordo com a análise de variância (ANOVA) com comparação de Tukey, não houve variação significativa do nitrogênio amoniacal entre as lamas e nem entre os percolados.

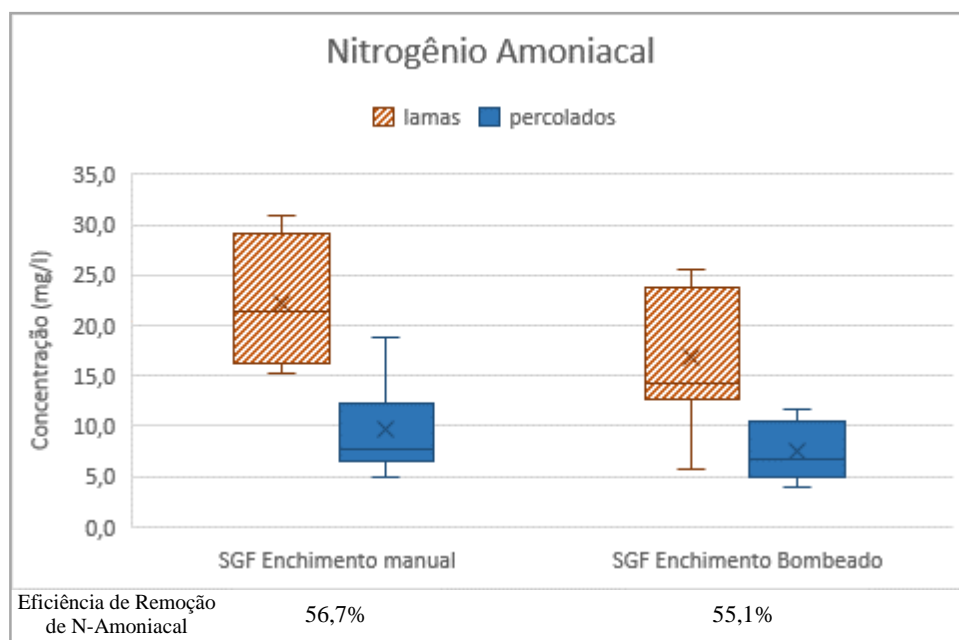


Figura 8.14 – Distribuição da concentração de Nitrogênio Amoniacal nas amostras de Lama e de Percolado, para SGF com enchimento manual e com enchimento bombeado.

Na Figura 8.14 constata-se ainda que os percolados gerados nos desaguamentos com SGFs apresentam eficiência média de remoção de nitrogênio amoniacal superior a 55% e todas as amostras indicaram concentração abaixo da máxima permitida para lançamento de efluentes (20,0 mg/l).

Entretanto, os valores médios de nitrogênio amoniacal dos percolados provenientes de SGF com enchimento manual ($9,6 \pm 3,7$ g/l) e enchimento bombeado ($7,6 \pm 2,6$ mg/l) encontram-se acima dos valores detectados nas águas da lagoa da Tijuca (0,7 a 0,9 mg/l), que por sua vez encontram-se ligeiramente superiores ao valor de 0,7 mg/l estabelecido como limite no padrão de qualidade da água deste corpo hídrico enquadrado como classe 2 – água salobra⁵⁹.

⁵⁹ Para as águas doces, a resolução nº 357/05 do CONAMA apresenta limite de nitrogênio amoniacal em função do pH, considerando que em faixa mais elevada de pH prevalece a parcela de amônia gasosa (NH₃) que é mais tóxica que a parcela do íon amônio (NH₄⁺).

8.2.4. Carga orgânica (DBO e DQO)

Na Figura 8.15 visualiza-se que a Demanda Química de Oxigênio (DQO) das lamas utilizadas para o enchimento manual apresentou valor médio de $17.674,0 \pm 5.918,0$ mg/l e as utilizadas para enchimento bombeado foram de $20.817,0 \pm 7.826,0$ mg/l. De acordo com análise de variância (ANOVA) não há diferença significativa de DQO entre as lamas (Valor-p de 0,363, quando $p < 0,05$ é significativa a divergência).

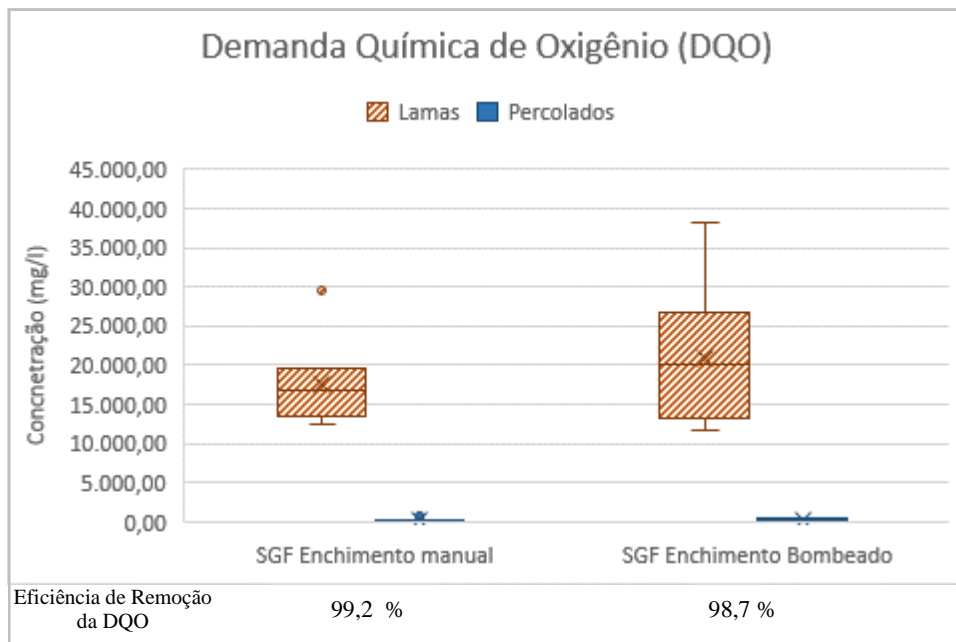


Figura 8.15 – Distribuição da concentração de Demanda Química de Oxigênio nas amostras de Lama e de Percolado, para SGF com enchimento manual e com enchimento bombeado.

Como simples referencial, os lixiviados de aterros sanitários com menos de 2 anos apresentam uma faixa de variação de DQO de 3.000 a 60.000 mg/l, com valores típicos de 18.000 mg/l (Souto, 2009). Nos esgotos sanitários brutos essa variável encontra-se na faixa de 400 a 800 mg/l e assume valor típico de 700 mg/l (Von Sperling, 2005).

Os percolados gerados nos SGFs de enchimento manual e de enchimento bombeado tiveram valores médios de DQO de $183,2 \pm 145,6$ mg/l e $279,2 \pm 114,4$ mg/l, respectivamente (Figura 8.15). Esses valores não divergem estatisticamente, método ANOVA com comparação de Tukey, da concentração média de DQO das águas da Lagoa da Tijuca, que se apresenta na ordem de 150,0 mg/l.

Com relação a eficiência de remoção de DQO, os SGFs apresentaram uma remoção média acima de 98,7%, conforme se observa na figura 6.26

Com relação a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), a Figura 8.16 indica através do *boxplot* que as lamas do enchimento manual e do enchimento bombeado apresentaram concentrações médias de $7.767,0 \pm 6.373$ mg/l e $7.220,0 \pm 4.485$ mg/l, respectivamente. Essas lamas ao passarem pelos SGFs geraram percolados com DBO média na faixa de $63,4 \pm 59,3$ a $100,5 \pm 54,2$ mg/l, indicando uma eficiência de remoção superior a 98,6%.

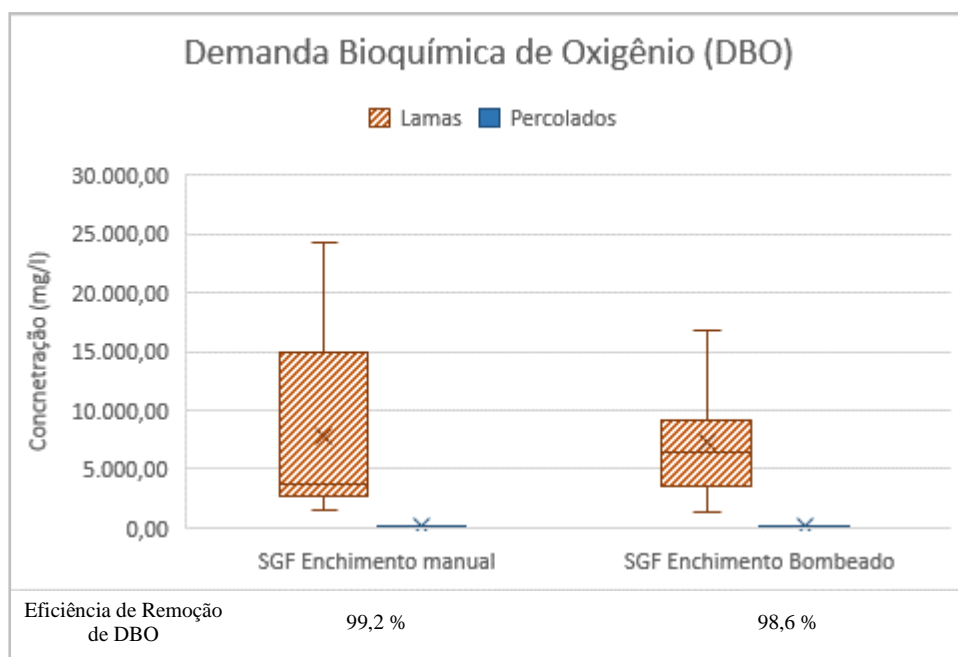


Figura 8.16 – Distribuição da concentração de Demanda Bioquímica de Oxigênio nas amostras de Lama e de Percolado, para SGF com enchimento manual e com enchimento bombeado.

Pelo método de análise da variância (ANOVA) esses valores de DBO dos percolados não apresentam divergência dos valores encontrados nas águas da lagoa da Tijuca (58,5 a 77,6 mg/l), evidência constatada pelo valor-p de 0,664 ($p < 0,05$ é significativa a divergência).

Não há regulamentação de padrão de DBO para enquadramento de águas salobras nem salinas. Entretanto, a referência normativa para lançamento de efluente proveniente de sistema de tratamento de esgoto sanitário estabelece o padrão máximo de 120 mg/l, sendo que esse limite poderá ser ultrapassado mediante estudo que comprove autodepuração do corpo hídrico.

A relação média DQO/DBO do percolado encontra-se na faixa de 2,2 a 2,8. Von Sperling (2005) relata que em esgotos domésticos brutos a relação DQO/DBO varia em

torno de 1,7 a 2,4 e a relação vai aumentando à medida que ocorre o tratamento, chegando a um efluente final do tratamento biológico com valor superior a 3,0.

8.2.5. Contaminantes inorgânicos (Elementos traço)

A determinação de elementos traço em amostras dos percolados gerados foi realizada pela técnica de Espectrometria de Emissão Óptica com Fonte de Plasma Indutivamente Acoplado (ICP OES), sendo detectado que as concentrações de Chumbo (Pb), Cobre (Cu) e Níquel (Ni) apresentaram valores inferiores a 0,01 mg/l. Portanto, abaixo dos valores de 0,5 mg/l, 1,0 mg/l e 2,0 mg/l estabelecidos para padrões de lançamento de efluentes.

Esses parâmetros haviam sido considerados como não detectados nas análises de água da lagoa da Tijuca, cujo enquadramento de águas salobras classe 2 estabelece os limites de 0,21 mg/l, 0,0078 mg/l e 0,074 mg/l, respectivamente.

Para o Zinco, a água da lagoa da Tijuca apresentou concentração máxima de 0,078 mg/l, enquanto o valor de enquadramento em águas salobras classe 2 é de 0,12 mg/l e o padrão de lançamento em efluente é 5,0 mg/l. Entretanto, as amostras dos percolados apresentaram concentração de Zinco com valores máximos de 2,5 mg/l apenas no SGF 01 (lama sem polímero e enchimento manual), nos demais SGFs as concentrações não passaram de 0,08 mg/l.

Com relação ao Ferro dissolvido o valor de enquadramento para as águas salobras classe 2 é de 0,3 mg/l, valor máximo detectado nos percolados gerados, e o padrão de lançamento em efluente é de 15,0 mg/l.

Portanto, os percolados gerados nos SGFs não apresentaram nenhum elemento traço analisado (Pb, Cu, Ni, Zn) acima dos valores permitidos para lançamento em corpo hídrico receptor.

8.2.6. Parâmetros complementares (CEE, pH, Eh)

A condutividade elétrica específica (CEE) da lama produzida variou significativamente devido as características da água da lagoa da Tijuca coletada na primeira e segunda campanha. A lama utilizada no enchimento manual do sistema

geotêxtil fechado, produzida com a água da primeira campanha, apresentou CEE entre 10,3 a 14,8 mS/cm. Por sua vez, a lama produzida com água da segunda campanha de coleta apresentou CEE entre 38,1 e 42,8 mS/cm (Figura 8.17).

O processo de desaguamento no sistema geotêxtil fechado gerou um percolado com valores de 14,3 mS/cm no desaguamento de enchimento manual e 47,1 mS/cm no desaguamento de enchimento bombeado (Figura 8.17).

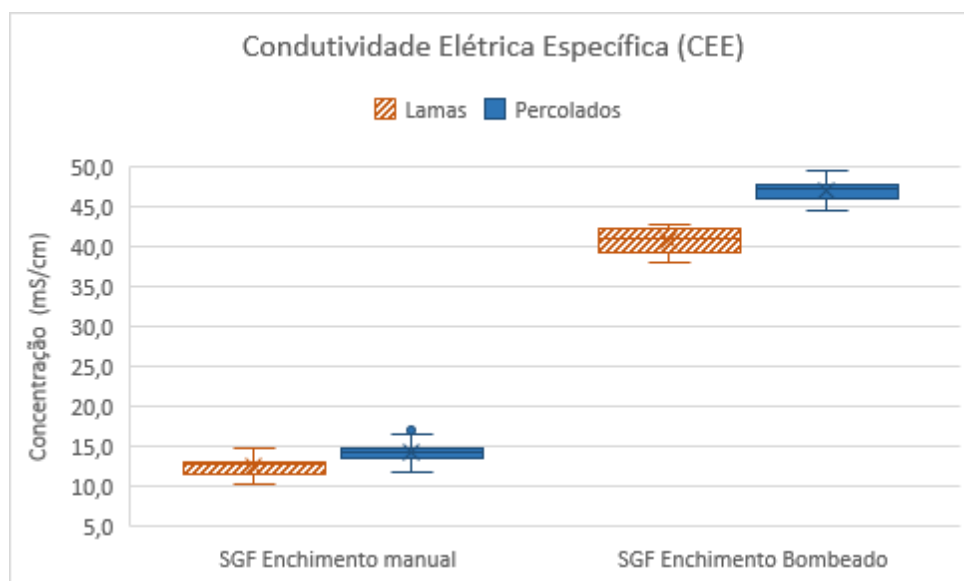


Figura 8.17 – Distribuição da condutividade elétrica específica nas amostras de Lama e de Percolado, para SGF com enchimento manual e com enchimento bombeado.

Esse aumento da condutividade elétrica específica das lamas do SGF de enchimento manual para os respectivos percolados não é considerado significativo estatisticamente pelo método de análise de variância (ANOVA) no procedimento de comparação de Tukey. Entretanto, nos percolados gerados pelas lamas do SGF com enchimento bombeado, o incremento médio de 17% da CEE com relação a lama de origem pode ser considerado significativo.

Esse fato provavelmente ocorre devido ao carreamento de sais do sedimento, proporcionado pela lavagem ocasionada nos ciclos de enchimento e constatado pelo decréscimo da condutividade elétrica específica média nas tortas retidas com relação à média do sedimento natural.

O potencial Hidrogeniônico (pH) dos percolados apresentaram valor médio de 8,45, indicando um aumento próximo a 14% quando comparado ao pH médio das lamas (Figura 8.18). As lamas provenientes dos enchimentos manual e bombeado não apresentaram variação substancial no pH, essa variação também não foi identificada nos percolados.

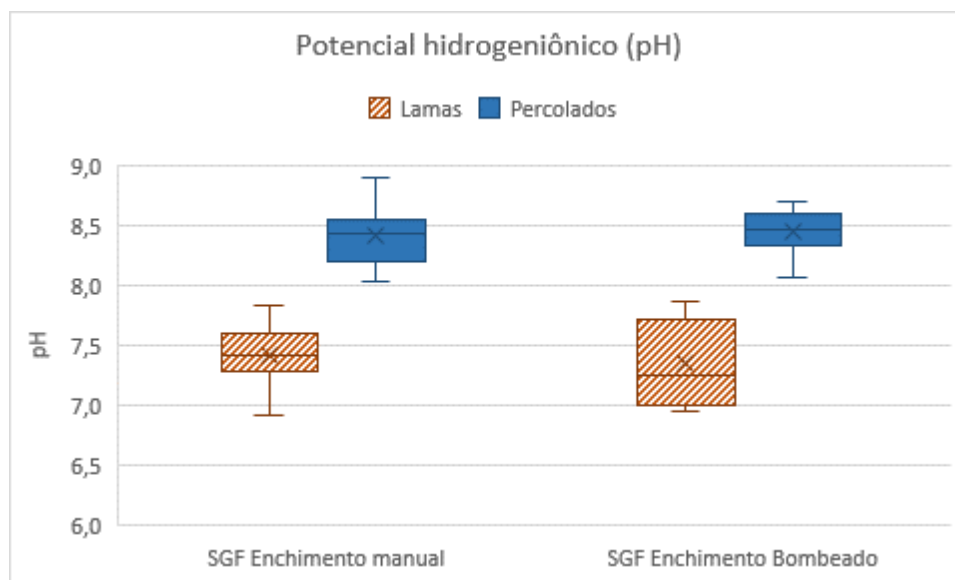


Figura 8.18 – Distribuição do potencial Hidrogeniônico (pH) nas amostras de Lama e de Percolado, para SGF com enchimento manual e com enchimento bombeado.

Ressalta-se que os valores de pH dos percolados encontram-se dentro da faixa de 5 a 9 indicada pela legislação que dispõe sobre padrão de lançamento de efluentes (resolução nº 430/11 do CONAMA). Portanto, permite-se o seu lançamento diretamente no corpo receptor, que em se tratando da lagoa da Tijuca o pH médio foi identificado em 8,5.

O potencial redox (Eh) das lamas produzidas encontraram-se negativos, na faixa de - 50 a -200 mV, indicando condições anóxica que favorecem a doação de elétrons. No percolado, o Eh passou a ser positivo com média na ordem de 170 mV, indicando espécies oxidadas com tendência a receberem elétrons, e próximo ao limite inferior da faixa de 174 a 242 mV encontrada na água da lagoa da Tijuca. A Figura 8.19 ilustra em boxplot as concentrações de potencial Redox (Eh) das lamas e percolados para os SGF com enchimento manual e bombeado.

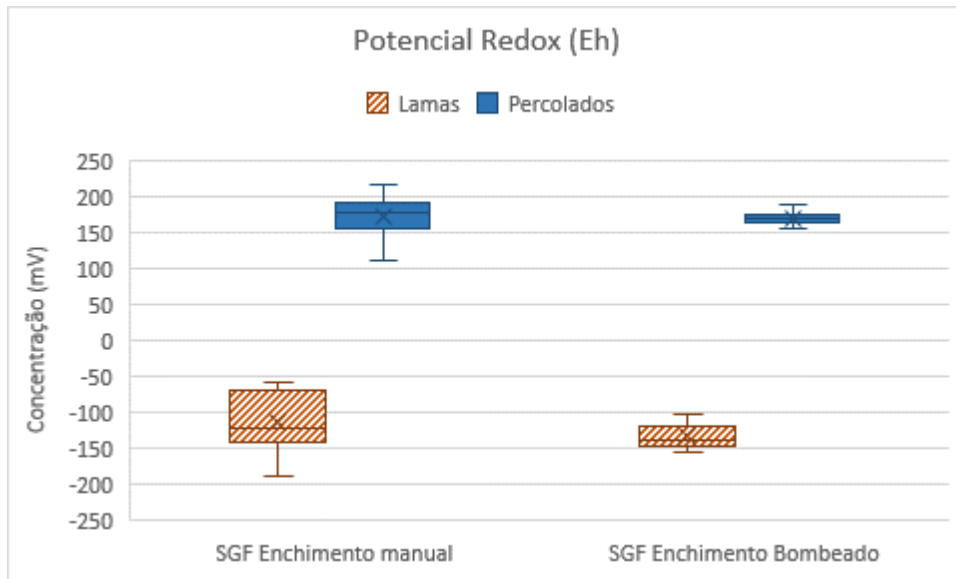


Figura 8.19 – Distribuição do potencial Redox (Eh) nas amostras de Lama e de Percolado, para SGF com enchimento manual e com enchimento bombeado.

Com o teste estatístico de análise de variância de modelo de regressão linear (ANOVA) constata-se que não houve variação significativa do potencial redox entre os percolados gerados e os mesmos tiveram uma alteração média de pelo menos 2,3 vezes maior que as características da lama de origem.

8.3. COMPORTAMENTO AMBIENTAL DA TORTA DE SEDIMENTO RETIDA

O processo de desaguamento em sistema geotêxtil fechado sob o ponto de vista da qualidade ambiental da torta de sedimentos retida foi analisado com base nos parâmetros a seguir discutidos.

8.3.1. Nutrientes (Fósforo e Nitrogênio) e Carbono orgânico total

Os teores de Fósforo total (P-total) das tortas retidas nos SGFs de enchimento manual das lamas com polímeros (SGF 04, 05 e 06) foram inferiores a 338,25 mg/kg. Nos SGFs de enchimento da lama sem polímero (SGF 01 e 07) e nos demais SGFs de enchimento bombeado (SGF 08 e 09) as concentrações de Fósforo nas tortas retidas ficaram, respectivamente, ligeiramente acima e dentro da faixa do valor médio de $560,1 \pm 123,6$ mg/kg encontrado nos sedimentos da lagoa da Tijuca a serem dragados e que compuseram a lama produzida (Figura 8.20).

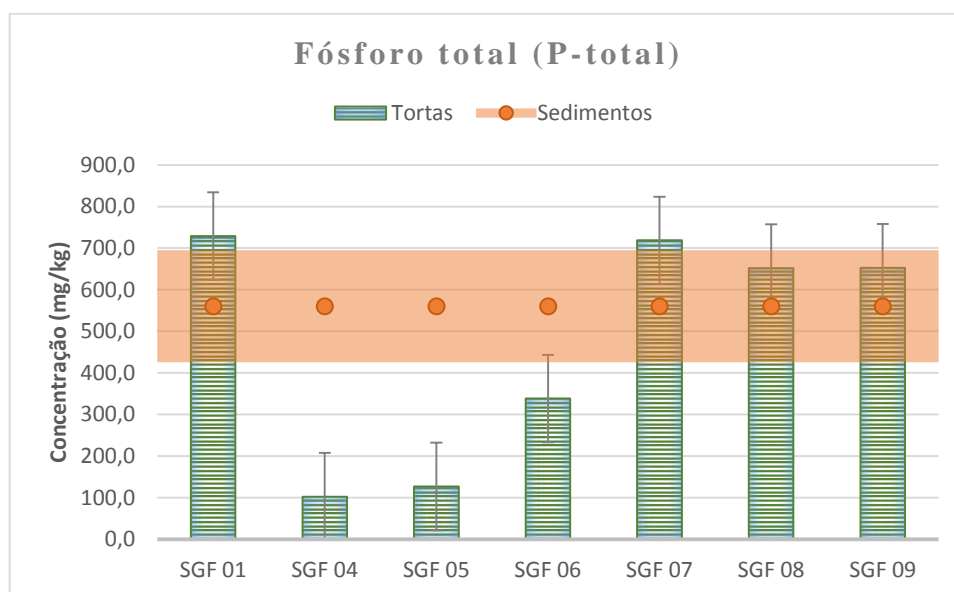


Figura 8.20 – Fósforo total (P-total) das tortas retidas pelos SGFs e dos sedimentos a serem dragados.

Para subsidiar a disposição do material dragado em águas de jurisdição nacional a resolução nº 454/12 do CONAMA prevê um valor de alerta de 2.000,0 mg/kg para o Fósforo total. Portanto, todas as tortas encontram-se dentro deste limite. Inclusive o SGF 04 e 05 indicaram as maiores eficiências de redução do Fósforo total, ou seja, 81,7 % e 77,4 %, respectivamente.

O Nitrogênio Kjeldahl Total (NTK) manteve-se estatisticamente constante nas tortas retidas nos SGFs de enchimento manual (SGF 01, 04, 05 e 06), cujos valores encontram-se próximos ao valor médio de $3.371,7 \pm 166,3$ mg/kg encontrado nos sedimentos da lagoa da Tijuca a serem dragados. Contudo, nas tortas de enchimento bombeado (SGF 07, 08 e 09), ocorreu um acréscimo de NTK quando comparado ao sedimento de origem, atingindo valores de até provavelmente pela maior condutividade elétrica específica da lama de origem (Figura 8.21).

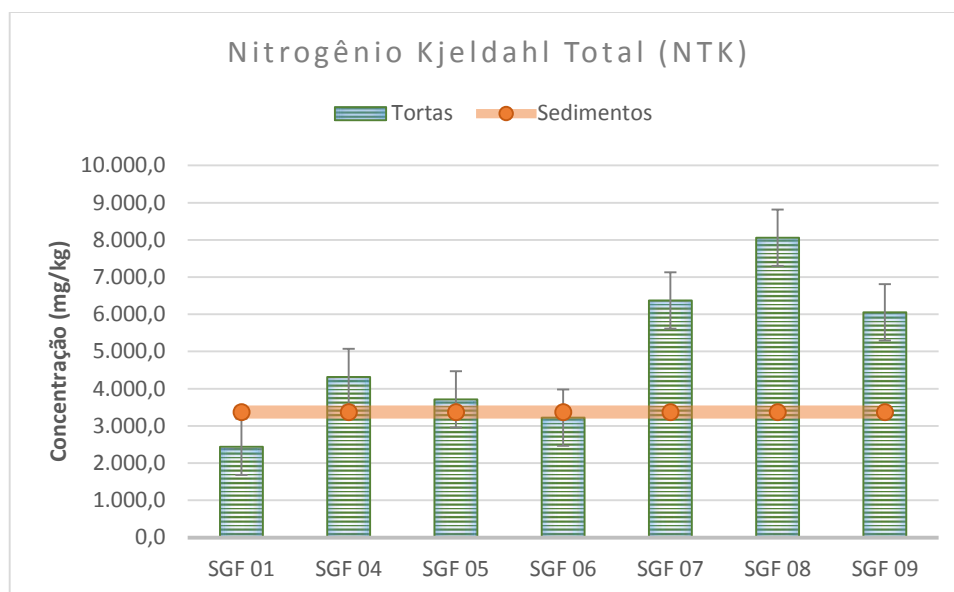


Figura 8.21 – Nitrogênio Kjeldahl total (NTK) das tortas retidas pelos SGFs e dos sedimentos a serem dragados.

Os critérios estabelecidos pela resolução nº 454/12 do CONAMA para a disposição do material dragado em águas de jurisdição nacional prevê um valor de alerta do Nitrogênio Kjeldahl Total de 4.800,0 mg/kg. Esse valor foi superado em pelas concentrações médias encontradas nas tortas retidas dos sistemas bombeados (SGF 07, 08 e 09) em pelo menos 80% (SGF 09).

O Carbono Orgânico Total (COT) médio do sedimento foi de $30.096,8 \pm 5.937,1$ mg/kg, conforme se visualiza na Figura 8.22, em que as tortas retidas nos SGFs apresentaram concentrações na faixa de 63.914,0 a 86.721,0 mg/kg,. Esses valores representam um incremento de COT na torta maior que o dobro do obtido nos sedimentos, porém ainda abaixo do valor de alerta de 100.000,0 mg/kg indicado pela resolução nº 454/12 do CONAMA para disposição do material em águas de jurisdição nacional.

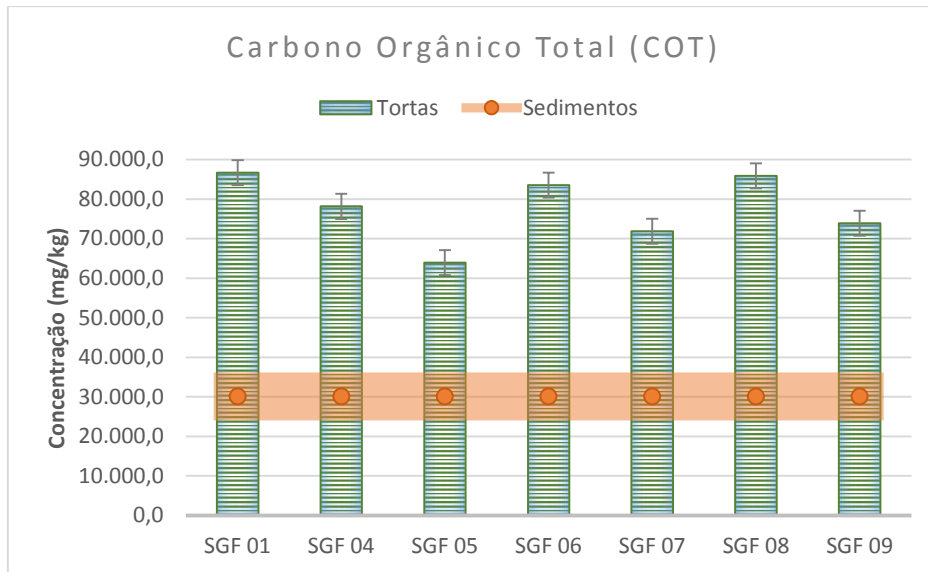


Figura 8.22 – Carbono Orgânico Total (COT) das tortas retidas pelos SGFs e dos sedimentos a serem dragados.

A Matéria Orgânica das tortas retidas nos SGFs e a dos sedimentos da lagoa da Tijuca apresentam-se estatisticamente similares, considerando o método de avaliação da variância (ANOVA). A Figura 8.23 ilustra que os valores de M.O das tortas retidas variaram de 10,7% a 14,6 %.

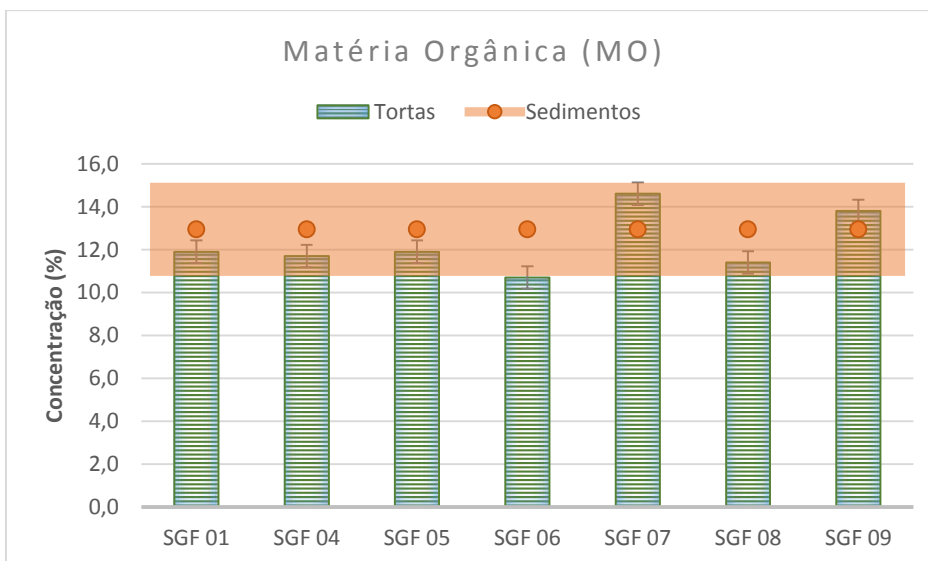


Figura 8.23 – Matéria Orgânica (M.O.) das tortas retidas pelos SGFs e dos sedimentos a serem dragados.

8.3.2. Contaminantes inorgânicos (Elementos traço)

Os elementos traço (Cu, Pb, Ni e Zn) encontrados nas tortas retidas nos SGFs foram verificados⁶⁰ e comparados aos níveis de classificação para disposição em águas sob jurisdição nacional, bem como aos valores orientadores para qualidade do solo.

A Figura 8.24 demonstra as concentrações médias de Cobre, Chumbo, Níquel e Zinco encontradas nas tortas retidas nos SGFs e indica, com base na análise da variância (ANOVA), que apenas o Zinco ocorre variação representativa entre as tortas retidas a partir de enchimento manual (SGF 01, 04, 05 e 06) e bombeado (SGF 07, 08 e 09), apresentando valores que variam de 65,3 a 179,3 mg/kg.

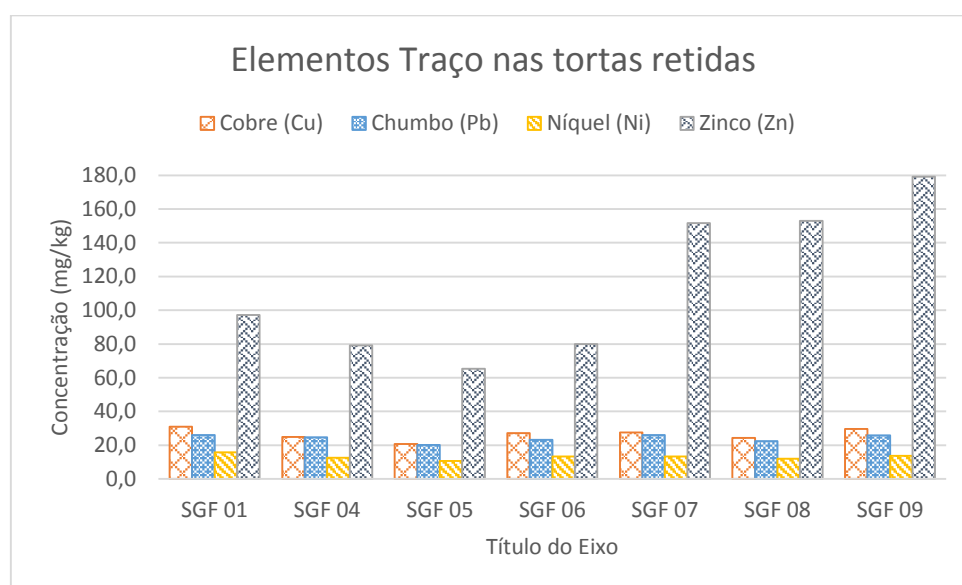


Figura 8.24 – Elementos traço (Pb, Cu, Ni, Zn) das tortas retidas pelos SGFs.

Considerando que os sedimentos que deram origem a lama de dragagem produzida apresentaram concentrações médias de Cobre, Chumbo, Níquel e Zinco equivalentes a $30,9 \pm 6,7$ mg/kg, $35,2 \pm 8,8$ mg/kg, $18,3 \pm 2,5$ mg/kg e $119,8 \pm 13,2$ mg/kg, respectivamente, constata-se um ligeiro aumento apenas da concentração de zinco nas tortas dos sistemas de enchimento bombeado (SGF 07, 08 e 09).

Quando os elementos traço (Cu, Pb, Ni e Zn) das tortas são comparados aos níveis de classificação definidos pela resolução nº 454/12 do CONAMA verifica-se que os

⁶⁰ Os elementos traço foram obtidos a partir da digestão parcial pelo procedimento EPA SW846 método 3050B e quantificados pela técnica de Espectrometria de Emissão Óptica com fonte de Plasma Indutivamente Acoplado (ICP OES) seguindo o procedimento EPA SW846 método 6010D.

mesmos se encontram abaixo do nível 1 (Cu, Pb, Ni) e abaixo do nível 2 (Zn). Sendo, portanto, requerido o ensaio de ecotoxicidade. Caso a análise toxicológica comprove menos de 50% com efeito tóxico é permitida, no que tange a esses parâmetros, a disposição da torta retida em águas de jurisdição nacional, inclusive de forma irrestrita dispersiva ou não, cujas definições foram citadas no item 2.7.4 do capítulo 2.

Na verificação da qualidade do solo, definida pela resolução nº 420/09 do CONAMA, os elementos traço (Cu, Pb, Ni e Zn) das tortas retidas encontram-se abaixo dos valores de prevenção (VP) e, portanto, é permitida a disposição diretamente no solo ou como aterro hidráulico, desde que não existam restrições ambientais e de uso e ocupação do solo.

Há de se destacar que esses experimentos foram realizados com lama produzida a partir dos sedimentos considerados dentre aqueles de maior contaminação no complexo lagunar de Jacarepaguá. Em complemento, vale salientar que uma discussão futura da normativa brasileira pode ser estabelecida com base na relação entre a forma de extração recomendada (digestão parcial próxima a biodisponibilidade) e os valores de referência estabelecidos, que se baseiam na concentração total. Inclusive pode-se discutir qual porção da amostra (a fração fina ou total) deve ser analisada para determinação do elemento traço em miligramas de contaminante por quilograma de sedimento.

8.3.3. Parâmetros complementares (CEE, pH, Eh e CTC)

A condutividade elétrica específica (CEE) das tortas retidas nos SGFs variou devido as características das lamas produzidas com a água da primeira e segunda campanha de coleta na Lagoa de Tijuca. Na Figura 8.25 observa-se que os valores de CEE obtidos nas tortas retidas foram comparados ao valor médio de $17,35 \pm 0,8$ mS/cm encontrado nos sedimentos a serem dragados.

As tortas retidas nos sistemas com enchimento manual (SGF 01, 04, 05, e 06) apresentaram CEE na faixa de 14,9 a 17,6 mS/cm, não indicando diferenças significativas do valor obtido no sedimento a ser dragado. No entanto, para as tortas provenientes dos sistemas com enchimento bombeado (SGF 07, 08 e 09) os valores de CEE são mais elevados e atuam numa faixa média de 33,2 a 56,2 mS/cm, recebendo interferência da água da segunda campanha de coleta com CEE médio de 55 mS/cm (Figura 8.25.).

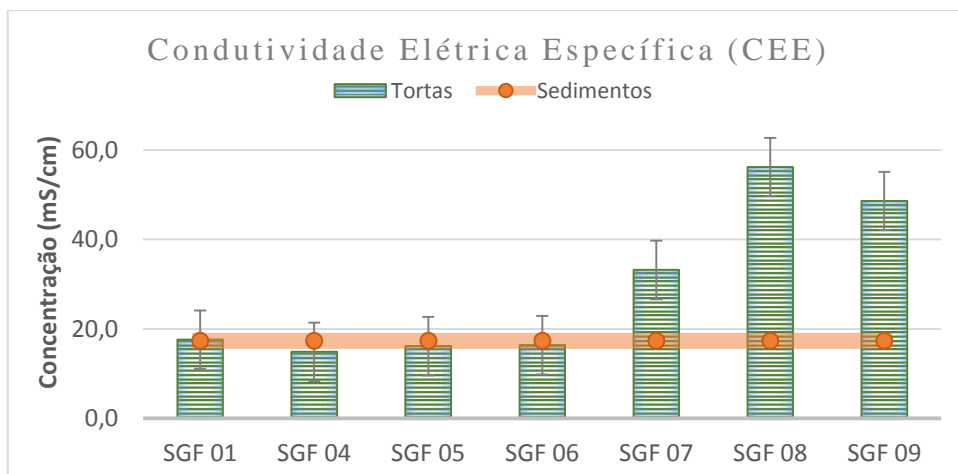


Figura 8.25 – Condutividade Elétrica Específica (CEE) das tortas retidas pelos SGFs e dos sedimentos a serem dragados.

Numa comparação da CEE das tortas retidas com a dos percolados gerados constata-se, como esperado, a mesma ordem de grandeza, cujas médias são 16,3 mS/cm para o enchimento manual e 46,0 mS/cm para o enchimento bombeado.

O potencial Hidrogeniônico (pH) das tortas retidas indica um material com acidez média variando de 3,21 a 3,72, ou seja, ligeiramente menor que o pH de $4,1 \pm 0,5$ correspondente ao sedimento que a originou (Figura 8.26).

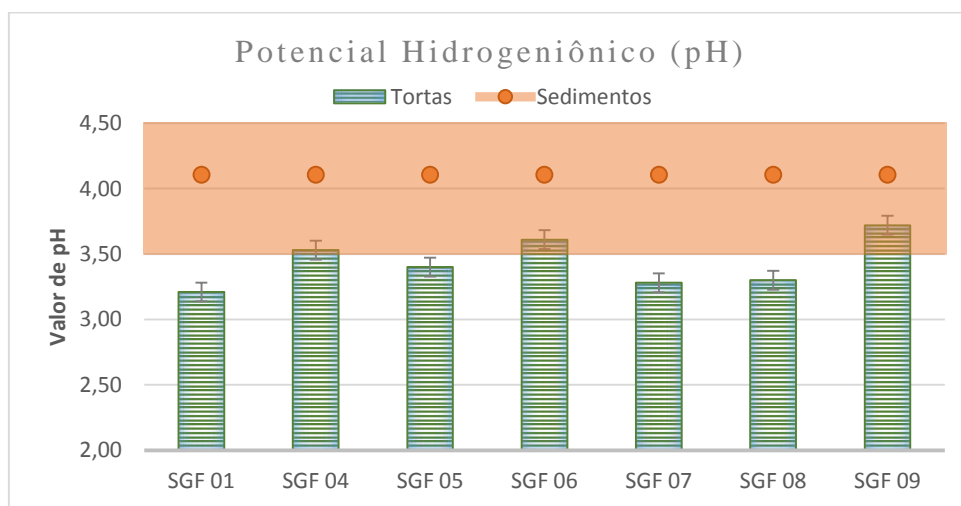


Figura 8.26 – Potencial Hidrogeniônico (pH) das tortas retidas pelos SGFs e dos sedimentos a serem dragados.

Esse aumento da acidez (decréscimo de pH) pode proporcionar uma solubilização dos metais carbonáticos do material retido, bem como a liberação de metais dos sulfetos metálicos e dos complexos organometálicos por ventura existentes (Borma, 1998). No entanto, neste trabalho os metais dissolvidos (Pb, Cu, Ni, Zn e Fe) não foram constatados

como elevados na análise dos percolados gerados e estão dentro dos padrões de lançamentos definidos pela resolução nº 460/11 do CONAMA.

O potencial redox (Eh) das tortas retidas nos SGFs encontraram-se positivos, na faixa de 265 a 320 mV, indicando condições anóxica que favorecem a doação de elétrons. Essa característica encontra-se ligeiramente superior, porém estatisticamente equivalente (método ANOVA), aos valores detectados nos sedimentos a serem dragados, cujo potencial redox médio é de $247,25 \pm 45,8$ mV, conforme se observa na Figura 8.27.

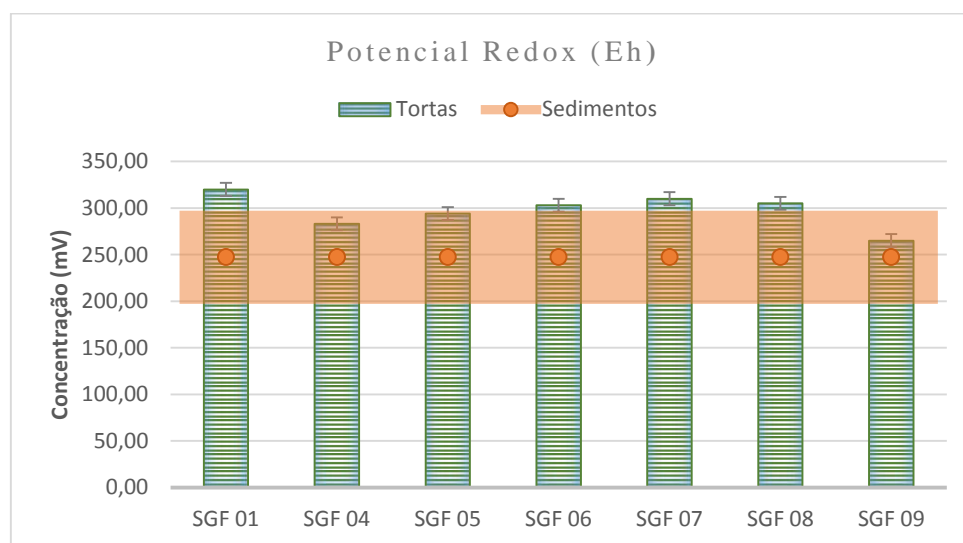


Figura 8.27 – Potencial Redox (Eh) das tortas retidas pelos SGFs e dos sedimentos a serem dragados.

A Capacidade de Troca Catiônica (CTC) relaciona-se às cargas negativas predominantes na superfície do sedimento que atraem cátions e os tornam disponíveis devido a troca com outros cátions de mesma carga. A capacidade máxima dessa carga negativa do sedimento é definida pela soma dos cátions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Al^{3+} , H^+) aderidos às partículas de argila e à matéria orgânica através de forças eletrostáticas. A Tabela 8.1 apresenta as concentrações de cátions e a CTC medida nas tortas retidas em cada SGF, bem como no sedimento de origem da lama produzida.

Tabela 8.1 – Capacidade de Troca Catiônica das tortas retidas nos SGFs e sedimentos de origem (presente trabalho) e em sedimentos de estudos de Borma (1998), Castiglia (2006) e Monteiro (2008)

Cátions (cmol _c /kg)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Al ³⁺	H ⁺	CTC
Torta SGF 01 ^a	9,8	30,5	36,9	2,1	5,8	26,7	111,7
Torta SGF 04 ^a	14,5	25,9	43,2	2,3	2,2	23,9	112,0
Torta SGF 05 ^a	10,8	25,2	36,0	1,8	3,8	26,6	104,2
Torta SGF 06 ^a	11,7	25,1	30,1	1,8	1,6	21,1	91,4
Torta SGF 07 ^b	15,0	46,3	144,0	2,8	4,3	26,4	238,8
Torta SGF 08 ^b	18,2	48,0	154,0	2,8	3,6	23,3	249,9
Torta SGF 09 ^b	20,2	42,0	139,0	3,9	1,3	22,7	229,1
Lagoa Tijuca Sedimentos	4,7 a 5,2	7,2 a 8,2	7,9 a 9,8	1,2 a 1,4	até 0,1	1,4 a 2,9	24,4 a 27,7
Lagoa Jacarepaguá Sedimentos ^c (Borma, 1998)	0,2 a 10,3	6,8 a 29,0	8,4 a 43,4	0,6 a 2,4	até 0,1	até 7,3	28,6 a 75,1
Lagoa Jacarepaguá Sedimentos ^c (Castiglia, 2006)	8,0	14,1	9,8	1,1	0,0	-	33,0
Canal do Fundão Sedimentos ^c (Monteiro, 2008)	6,17 a 8,27	10,8 a 15,6	37,3 a 38,5	2,6 a 3,3	-	-	57,7 a 64,7

a - Enchimento manual

b - Enchimento bombeado

c - Amostras lavadas com água destilada e centrifugada para retirada dos sais presentes na água livre

Na Tabela 8.1 observa-se que os sedimentos coletados na lagoa da Tijuca apresentaram uma CTC de 24,4 a 27,7 cmol_c/kg classificado como média a alta de acordo com escala de Jaramillo (1996) apud Castiglia (2006). Esses valores encontram-se equiparados ao limite inferior dos valores de CTC obtidos por estudos (Borma, 1998; Castiglia, 2006 e Monteiro, 2008) realizados em sedimentos da lagoa de Jacarepaguá e do Canal do Fundão.

Neste contexto, vale refletir sobre a discussão de Barbosa (1994) apud Borma (1998), que comenta o fato de que a matéria orgânica pode formar uma espécie de cobertura nos minerais argílicos, e, portanto, tratar de uma CTC relativa. Quando se remove a matéria orgânica, é possível esperar redução significativa da CTC, no entanto pode-se expor um argilomineral preponderante e de elevada CTC como uma montmorilonita (80 a 150 cmol_c/kg).

A CTC das tortas com enchimento manual apresentou-se na faixa de 91,4 a 112,0 cmol_c/kg, enquanto que nas tortas de enchimento bombeado esse valor esteve entre 229,1

a 249,9 cmol_c/kg devido principalmente a interferência da salinidade da água de mistura da lama de origem, observado pelo valor da CEE. Em virtude da presença dos sais solúveis não foi possível classificar o potencial da capacidade de troca catiônica das tortas retidas, no entanto contata-se pela análise de variância (ANOVA) que não há variação significativa entre as tortas de enchimento manual e nem entre as tortas de enchimento bombeado.

Domingues (2009) relata que quanto maior o pH, maior a CTC e conseqüentemente mais locais de adsorção disponíveis, tanto para elementos de fertilidade do solo, quanto para os metais pesados. Essa reflexão deve ser observada, considerando que a metodologia de determinação da CTC utiliza um pH em torno de 7,0 e o pH do sedimento e da torta oscilam entre 3,2 e 4,5.

8.3.4. Classificação da torta retida segundo a norma de resíduos sólidos

De acordo com a análise de classificação dos resíduos sólidos, instituída pela NBR 10.004/04, a torta retida apresenta características de um resíduo Classe II A – Não Inerte. Essa classificação foi definida após detectar que o extrato solubilizado, obtido por meio do procedimento definido pela NBR 10006/04⁶¹, obteve parâmetros acima dos padrões constantes no anexo G da referida norma de classificação.

Dentre os constituintes solubilizados com concentrações que extrapolam os padrões, tem-se o Alumínio, Ferro, Manganês e o Zinco, além daqueles ligados diretamente a presença de sais como o sódio e cloreto, cujos valores são indicados na Tabela 8.2.

⁶¹ O procedimento consiste em agitar por 5 minutos em baixa velocidade uma amostra de 250 gramas de material seco menor que 9,5 mm à 1000 ml de água deionizada, deixando a mistura em repouso por 7 dias a 25°C, quando se promove a filtração com membrana de 0,45 µm para obter o extrato solubilizado que passará por análises físico-químicas.

Tabela 8.2 – Parâmetros que extrapolaram os padrões definidos no ensaio de solubilização para classificação da torta retida.

Parâmetro	Padrão Anexo G NBR 10.004/04 (mg/l)	Extrato solubilizado da torta retida (mg/l)
Alumínio	0,2	10,0
Ferro	0,3	61,6
Manganês	0,1	4,0
Zinco	5,0	5,7
Sódio	200,0	3.994,2
Cloreto	250,0	10.665,5

Vale lembrar que os argilominerais são materiais constituídos por silicatos hidratados de Alumínio e Ferro, e juntamente com o Manganês, compõem a lista dos 12 elementos mais abundante da crosta terrestre. Todavia, o excesso desses elementos pode interferir na saúde humana e provocar problemas nos rins, no fígado e no sistema nervoso central, respectivamente.

Dentre os elementos metais discutidos no sedimento de dragagem, o Zinco foi o que extrapolou o padrão no extrato solubilizado, impedido a classificação de material inerte.

Os elevados valores de Sódio e o Cloreto podem ser justificados, considerando que a torta retida analisada foi aquela proveniente de lama produzida com água coletada na segunda campanha, cuja capacidade elétrica específica alcançou características de maior salinidade.

Embora essa classificação da torta de sedimentos retidos tenha sido realizada como equiparação aos resíduos sólidos, tal medida requer parcimônia tendo em vista que as formas de destinação previstas para sedimentos dragados e resíduos sólidos são diferenciadas.

8.4. COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DA TORTA DE SEDIMENTO RETIDA

O processo de desaguamento em sistema geotêxtil fechado sob o ponto de vista das características geotécnicas da torta de sedimentos retida foi analisado com base nos parâmetros a seguir discutidos.

8.4.1. Granulometria, Densidade dos grãos e Limites de Atterberg

As curvas granulométricas geradas para as tortas retidas foram comparadas àquelas obtidas para os sedimentos da lagoa da Tijuca que compuseram as lamas utilizadas no enchimento manual e bombeado dos SGFs.

Novamente, considerando que os solos orgânicos com alta umidade tendem a expandir, dificultando a leitura de sedimentação no densímetro, e que o ensaio de granulometria por via úmida é recomendado para evitar dificuldades no destorroamento e consequente granulometrias indicando grãos maiores, as amostras foram trabalhadas com umidades médias de $63 \pm 5 \%$.

A porcentagem de finos das tortas com enchimento manual variou de 70% a 85%, uma faixa próxima ao do sedimento de origem (74% a 89%). Entretanto, nas tortas de enchimento bombeado a faixa foi de 91% a 98%, apresentando características de um solo mais fino. Tal fato pode ser justificado pelo maior agito proporcionado no bombeamento e o consequente desprendimento e quebra de partículas. Essa variação granulométrica pode ser observada na Figura 8.28 que apresenta as curvas granulométricas das tortas retidas e do sedimento de composição da lama de dragagem.

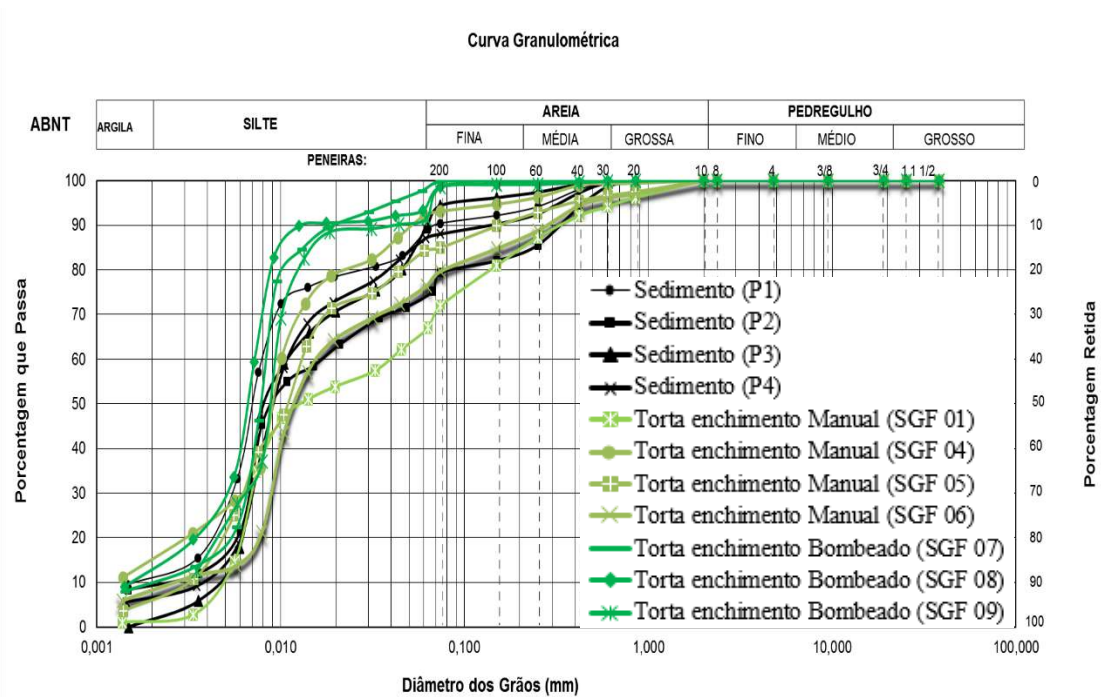


Figura 8.28 – Curvas granulométricas das tortas retidas nos SGFs de enchimento manual e bombeado, e o sedimento de composição da lama produzida.

O coeficiente de não uniformidade (C_{nu}) e o coeficiente de curvatura (C_c), calculados a partir dos diâmetros abaixo do qual se situam 10, 30, e 60% das partículas, indicaram tortas retidas com partículas muito uniforme ($C_{nu} \leq 5$) e de uniformidade média ($5 < C_{nu} \leq 15$). Os coeficientes de curvatura (C_c) classificam as tortas retidas em graduação aberta com predominância de descontinuidade ($C_c \leq 1$) e bem graduada ($1 < C_c \leq 3$), conforme se observa na Tabela 8.3.

Tabela 8.3 - Coeficientes de Não Uniformidade (C_{nu}), coeficiente de Curvatura (C_c) e Critério de retenção das tortas geradas nos SGFs

Amostra das Tortas	D_{90} (mm)	D_{60} (mm)	D_{30} (mm)	D_{10} (mm)	C_{nu}	C_c	Critério de retenção O_{90}/D_{90}
SGF 01	0,345	0,039	0,007	0,005	8 - UM	0 - GA	0,7
SGF 04	0,053	0,010	0,006	0,009	1 - MU	0 - GA	4,5
SGF 05	0,156	0,013	0,006	0,003	4 - MU	1 - GA	1,5
SGF 06	0,287	0,016	0,009	0,003	6 - UM	2 - BG	0,8
SGF 07	0,020	0,008	0,006	0,002	4 - MU	2 - BG	12,0
SGF 08	0,014	0,007	0,005	0,002	5 - UM	2 - BG	17,2
SGF 09	0,041	0,009	0,006	0,002	5 - UM	2 - BG	5,8

Nota:

C_{nu} = Coeficiente de Não Uniformidade : MU = Muito Uniforme e UM = Uniformidade Média

C_c = Coeficiente de curvatura: GA = Graduação Aberta e BG = Bem Graduado

O_{90} = Tamanho da abertura de filtração do geotêxtil onde 90% do material passa

D_{90} = Diâmetro característico do solo na qual 90% do material passa

Christopher & Fischer (1992) alertam que ao constatar coeficiente de não uniformidade (Cnu) maior que 3 o geotêxtil geralmente permite a passagem de partículas finas.

O critério de retenção (Tabela 8.3), definido pela relação da abertura de filtração do geotêxtil (O_{90}) e o diâmetro (D_{90}) característico da torta, variou de 0,7 a 4,5 para as tortas de enchimento manual, enquanto que nas tortas de enchimento bombeado a faixa foi de 5,8 a 17,2. Embora esse critério seja apresentado como referência na literatura conforme citado no capítulo 3, os valores encontrados neste estudo referem-se ao material retido em 5 ciclos de enchimento, onde o efeito do *filter cake* contribuiu com a retenção de torta com diâmetro de finos (D_{90}) de 0,014 mm, absurdamente inferior a abertura de filtração do geotêxtil utilizado que foi de 0,24 mm.

Os sedimentos da lagoa de Tijuca que deram origem a lama de dragagem produzida apresentaram densidade relativa dos grãos com valor médio de $2,43 \pm 0,02$ e as tortas retidas nos SGFs indicaram valores de densidade relativa dos grãos na faixa de 2,43 a 2,54, conforme ilustra a Figura 8.29. Esse aumento na densidade não é significativo, mas pode ser justificado pela redução da matéria orgânica retida e pela perda de finos, especialmente dos argilominerais.

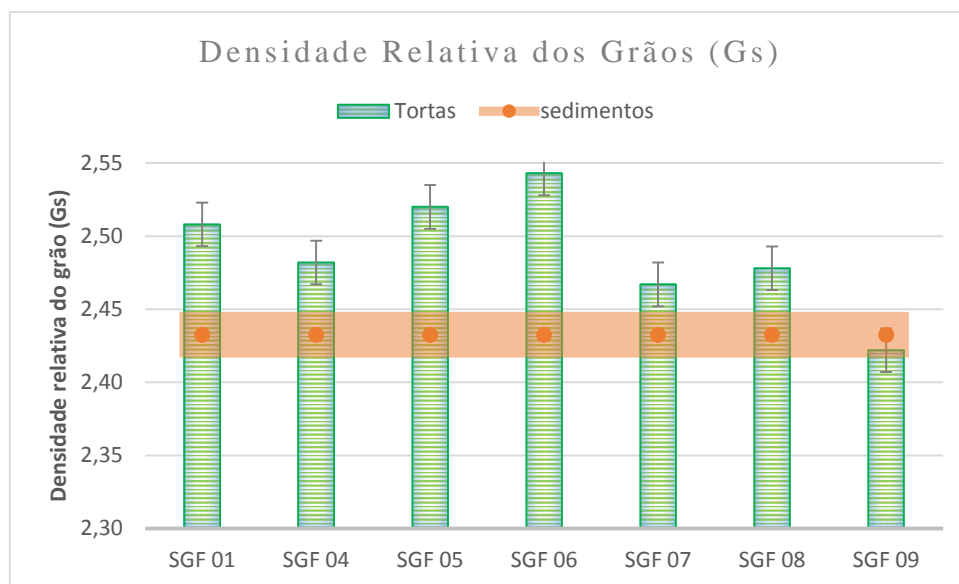


Figura 8.29 – Densidade Relativa dos Grãos (Gs) das tortas retidas pelos SGFs e dos sedimentos a serem dragados.

Com relação aos limites de Atterberg, constata-se na Tabela 8.4 que as tortas retidas apresentaram valores de 77 a 208% para limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP) encontrou-se na faixa de 27 a 108%, resultando em um material com alto índice de plasticidade (IP) variando de 50 a 100%.

Tabela 8.4 - Limites de Atterberg e índices para as tortas dos SGFs e do sedimento da Lagoa da Tijuca

Amostras	LL (%)	LP (%)	LC (%)	IP (%)	IA (%)	% argila	% finos
SGF 01	85,0	35,0	25,7	50,0	12,5	4	70
SGF 04	88,0	34,0	38,5	54,0	3,6	15	82
SGF 05	77,0	27,0	33,4	50,0	7,1	7	85
SGF 06	85,0	34,0	31,5	51,0	6,4	8	76
SGF 07	183,1	95,2	30,8	87,9	8,8	10	98
SGF 08	186,5	101,7	31,5	84,8	6,5	13	93
SGF 09	208,0	108,0	34,2	100,0	10,0	10	91
Sedimentos (média ± desvio padrão)	198,3 ± 43,3	60,5 ± 9,0	-	137,8 ± 34,7	27,0 ± 15,0	9,3 ± 4,2	85,9 ± 11,2

Esses limites de liquidez e plasticidade encontram-se dentro da faixa encontrada por Almeida, Borma e Barbosa, (2001) para a lagoa da Tijuca, ou seja, 73 a 355% para LL e 25 a 130% para LP.

O índice de atividade (IA) decorrente da carga superficial do argilomineral indicou uma argila ativa com valores de IA entre 3,6 e 12,5 (%), muito acima do valor de 1,25 determinado como ativo no critério de Skempton (1953).

O índice de plasticidade (IP) dos sedimentos da lagoa da Tijuca utilizados para enchimento dos SGFs encontra-se na média de $138 \pm 34,7\%$. As tortas retidas nos SGFs indicaram uma redução do IP em aproximadamente 63% para as tortas de enchimento manual e 34% para as tortas de enchimento bombeado (Figura 8.30). Provavelmente a maior capacidade elétrica específica das tortas de enchimento bombeado, que configura na presença de sais, contribuem para a manutenção da plasticidade.

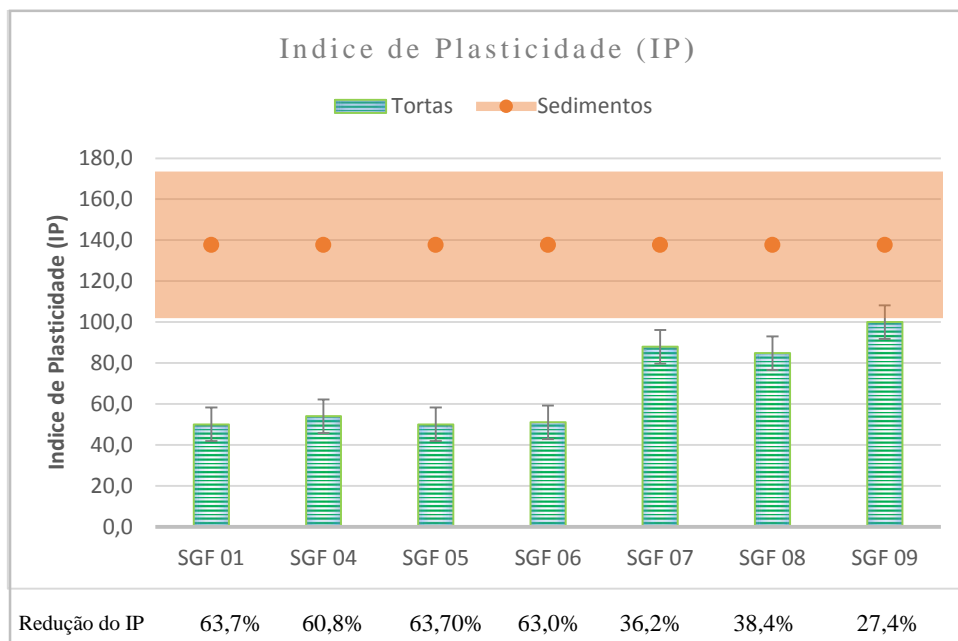


Figura 8.30 – Índices de Plasticidade (IP) das tortas retidas pelos SGFs e dos sedimentos a serem dragados.

8.4.2. Teor de sólidos em peso e eficiência do desaguamento

Os teores de sólidos em peso (TSp) das tortas após 40 dias de desaguamento variaram de 38,9 % até 43,1% (Figura 8.31). De acordo com Melo et al. (2012) teor de sólido próximo de 50,0% foi alcançado após 30 dias de desaguamento no experimento com lama de dragagem do porto do Rio de Janeiro destinados à Sistemas Geotêxteis Fechados instalados na ilha de pombeba. Destaca-se que no referido estudo o teor de sólidos da lama e percentual de finos não foram relatados, e aqui trabalhou-se com lama num teor de sólidos de 10% e um sedimento com média de $85,9 \pm 11,2\%$ de finos.

Vale destacar que segundo Pedroza et al. (2010) outros sistemas de desaguamento como leito de secagem, centrífugas e filtro prensa de placas, geram tortas a partir da digestão aeróbia do tratamento de esgoto com TSp na faixa de 25 a 30%, 20 a 25%, 25 a 35%, respectivamente.

Para a avaliação da eficiência de desaguamento (ED) citada por Moo-Young et al. (2002), considera-se as lamas de dragagem produzida com TSp de $10,0 \pm 0,82$ e TSp das tortas retidas em cada SGF, após 40 dias do último ciclo de enchimento, cuja variação média foi de $41,3 \pm 1,4$ %. Novamente os SGFs de enchimento manual apresentaram

melhores eficiências com ED acima de 320,5%, enquanto os SGFs de enchimento bombeado (SGF 07 a 09) obtiveram ED na faixa de 288,7% a 308,2% (

Figura 8.31).

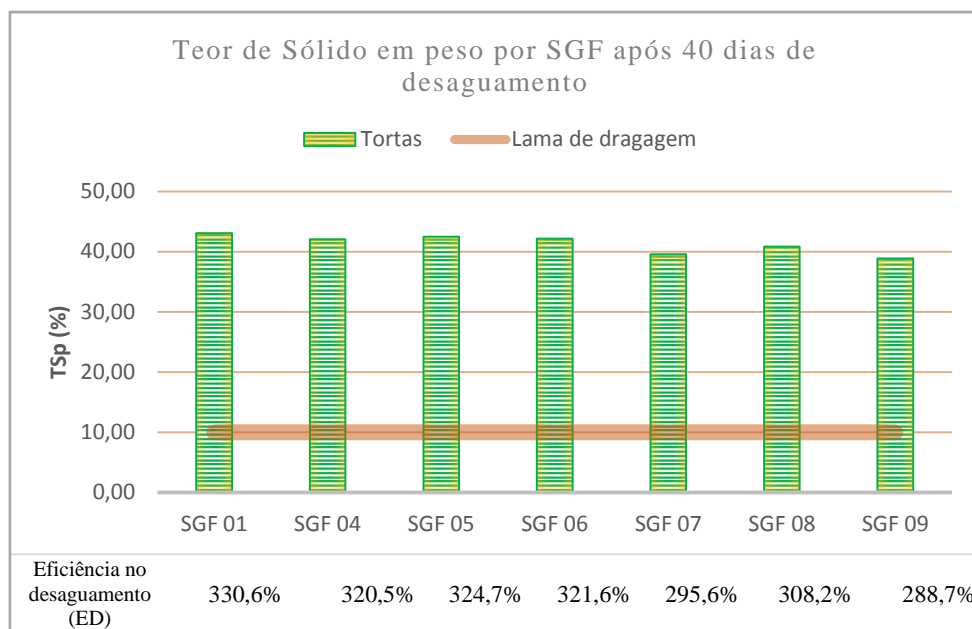


Figura 8.31 – Teor de Sólidos em peso (TSp) das tortas retidas pelos SGFs, da lama de dragagem produzida e as respectivas eficiências de desaguamento.

8.4.3. Resistência ao cisalhamento em função do tempo e da umidade

Com objetivo de verificar como a perda da umidade com o tempo interfere no ganho da resistência ao cisalhamento não drenado, as 07 (setes) tortas retidas nos Sistemas Geotêxteis Fechados passaram por ensaios de mini palheta (*mini vane test*) em períodos sequenciais até 40 dias após o último enchimento, conforme descrito na metodologia.

Os resultados dos 56 pontos ensaiados indicam um crescimento da resistência não drenada (S_u) com o tempo, conforme se observa na Figura 8.32. Evidencia-se que próximo aos 40 dias de secagem as tortas dos SGFs de enchimento bombeado (SGF 07 a 09) chegaram a uma resistência não drenada entre 9,0 a 13,0 kPa, enquanto as tortas dos SGFs de enchimento manual alcançaram valores entre 15,0 a 20,2 kPa.

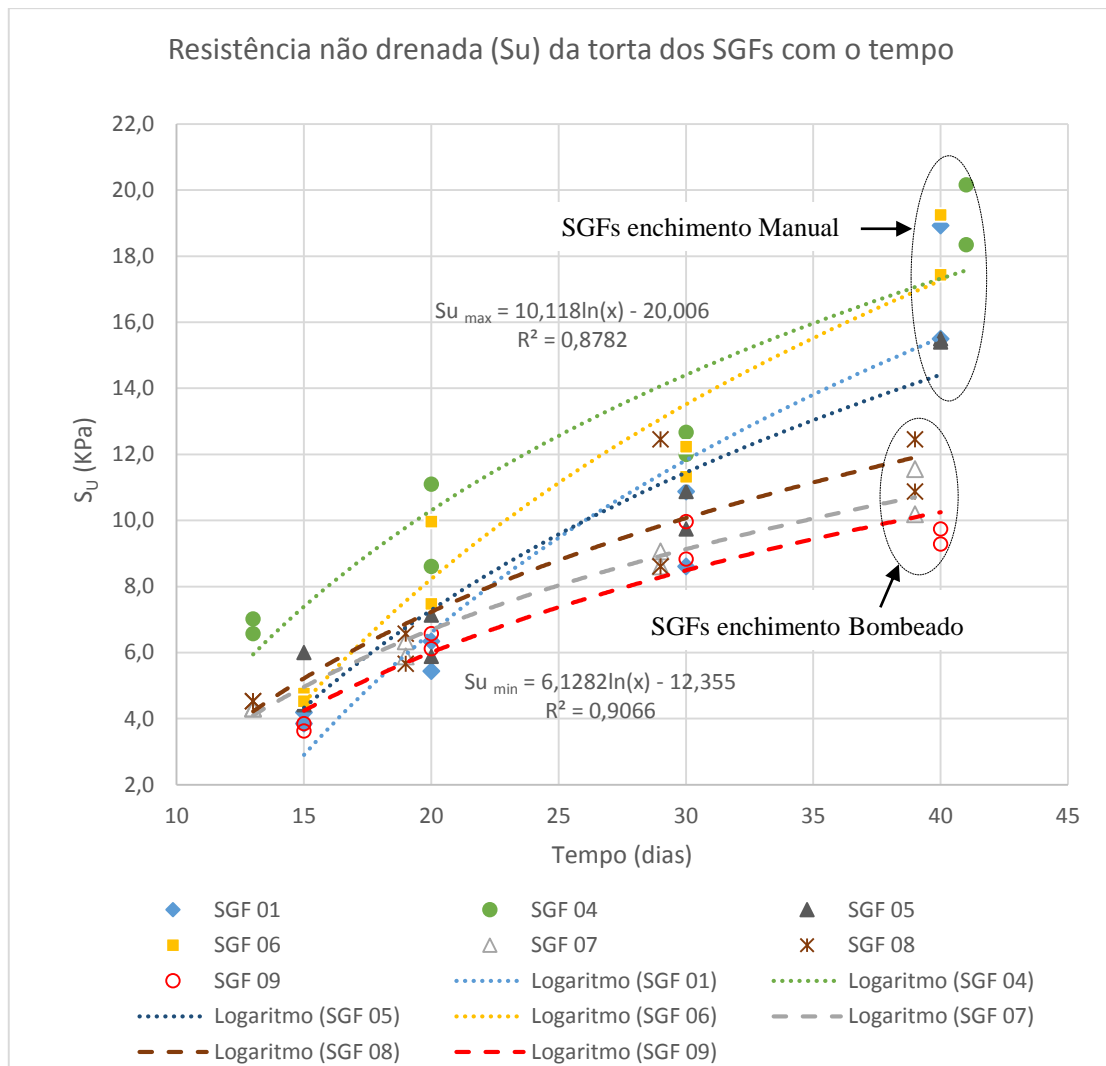


Figura 8.32 – Resistência não drenada (S_u) e não amolgada das tortas retidas nos SGFs em função do tempo de desaguoamento e linhas de tendências.

Considerando a Figura 8.32 foi possível estabelecer equações logarítmicas para as linhas de tendência mínima e máxima, donde se obtém um valor de S_u entre 10,25 kPa e 17,32 kPa para 40 dias após o último ciclo de enchimento dos SGFs.

Na verificação do ganho de resistência não drenada com relação a redução da umidade, constatou-se uma dispersão não uniforme mas que pode ser limitado por linhas de tendências extremas que geraram equações de $S_{u_{max}}$ e $S_{u_{min}}$ em função da umidade (Figura 8.33). Assim, para umidade próxima a 140%, quando a torta apresenta teor de sólido em peso perto de 42%, a resistência não drenada varia de 11,8 kPa a 17,2 kPa.

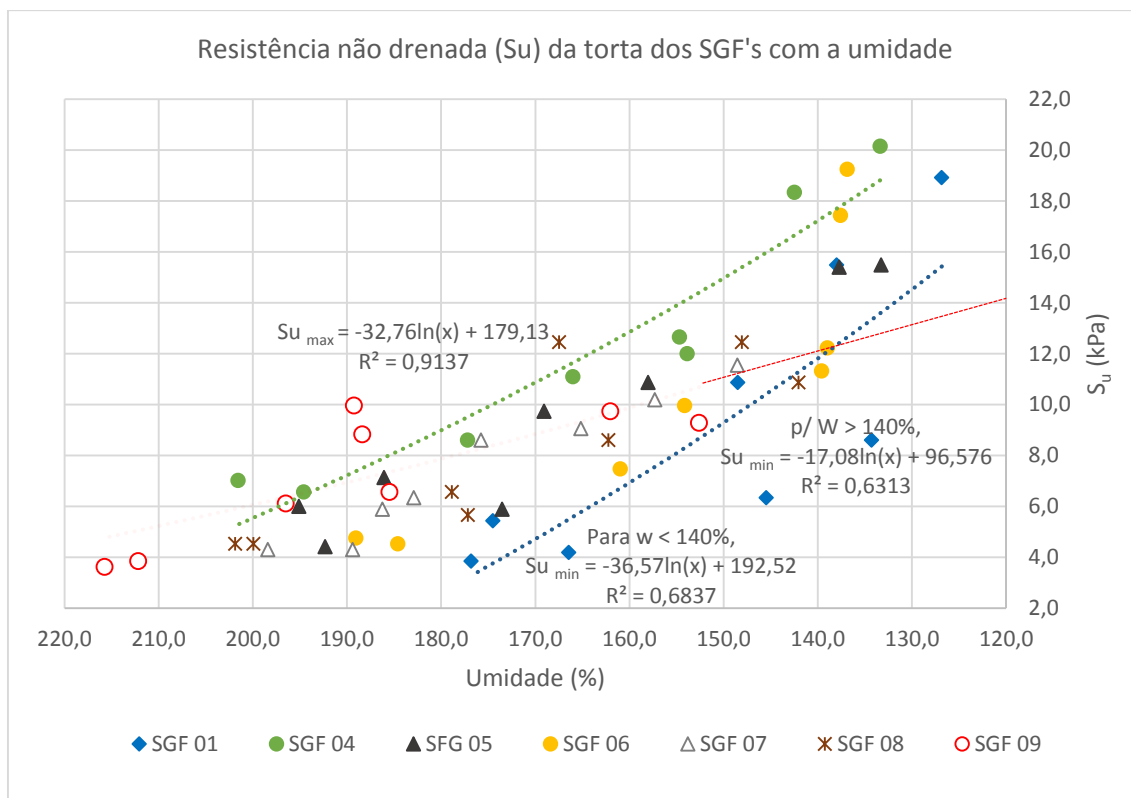


Figura 8.33 – Resistência não drenada (S_u) das tortas retidas nos SFGs em função da umidade, com curvas de tendência máxima e mínimas.

Outros dados obtidos podem ser utilizados em trabalhos futuros para efetuar diversas correlações de obtenção da resistência não drenada, tais como: S_u/σ'_{vo} e o índice de plasticidade; S_u/σ'_{vm} e o índice de plasticidade, bem como S_u e o índice de liquidez, todos amplamente discutidos por Baroni (2016).

8.4.4. Parâmetros de compressibilidade e índices físicos

Corpos de prova indeformados das tortas de sedimentos retidas nos 07 (sete) SFGs foram submetidos ao ensaio de compressão oedométrica após 40 dias do último ciclo de enchimento, conforme procedimento previsto nos materiais e métodos.

De início, os corpos de prova de cada SFG's tiveram umidade gravimétrica (W_d), Grau de saturação inicial (S_0) e Teor de sólido em peso (TSp) determinados. Sendo verificado a luz da Figura 8.34, que com 40 dias após o último ciclo de enchimento dos sistemas, a umidade das tortas retidas encontrava-se na faixa de 127,9 a 159,9 % e a saturação média era de $94,8 \pm 2,3$ %.

O teor de sólido em peso não apresentou variação significativa entre as tortas de sedimento retidas, mantendo-se na ordem de 40%, conforme citado anteriormente quando se verificou esse parâmetro em complemento ao ensaio de mini palheta. Pode-se dizer que o procedimento de desaguamento nos SGFs conduziu a valores próximos de umidade, grau de saturação e teor de sólidos, mostrando certa uniformidade nos valores esperados para este tipo de operação.

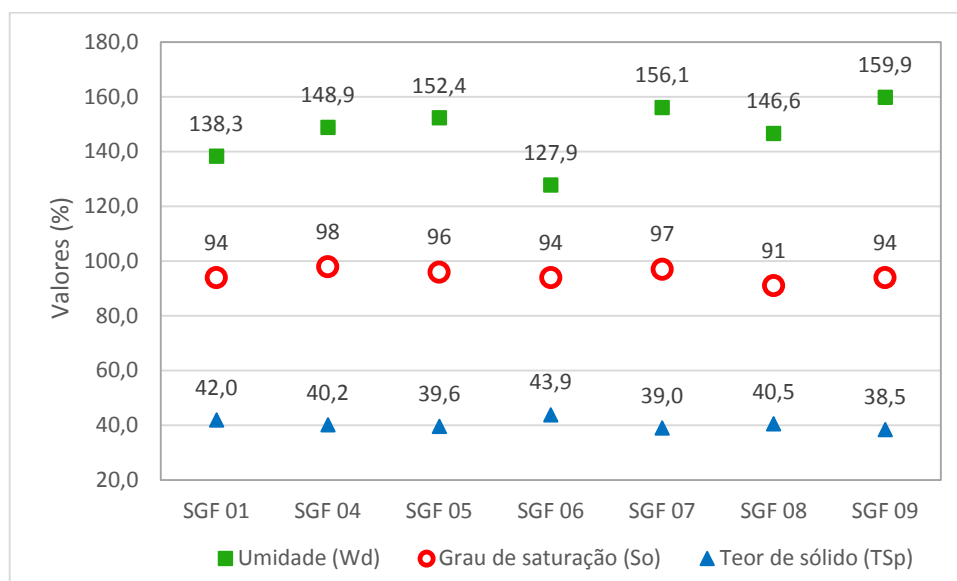


Figura 8.34 – Porcentagem de umidade gravimétrica, de saturação e de sólidos das tortas retidas em cada SGF, após 40 dias do último ciclo de enchimento.

Pelo método de Taylor foram determinados os coeficientes de adensamento vertical (C_v) conforme estabelecido nos materiais e métodos. Esses coeficientes de adensamento vertical (C_v) são importantes para o cálculo de recalque em função do tempo e apresentou, dentro do domínio normalmente adensado, valores entre $1,8 \times 10^{-8}$ a $6,0 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, com valor médio de $3,8 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ($1,2 \text{ m}^2/\text{ano}$) para as sete tortas retidas ensaiadas (Figura 8.35).

Esse resultado apresenta a mesma ordem de grandeza dos estudos desenvolvido por Baroni (2016) para argilas extremamente moles da Baixada de Jacarepagua, $C_v = 2,3 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ($0,7 \text{ m}^2/\text{ano}$). Este valor médio também é reportado por Almeida et al. (2008) para certos sítios da região metropolitana do Rio de Janeiro.

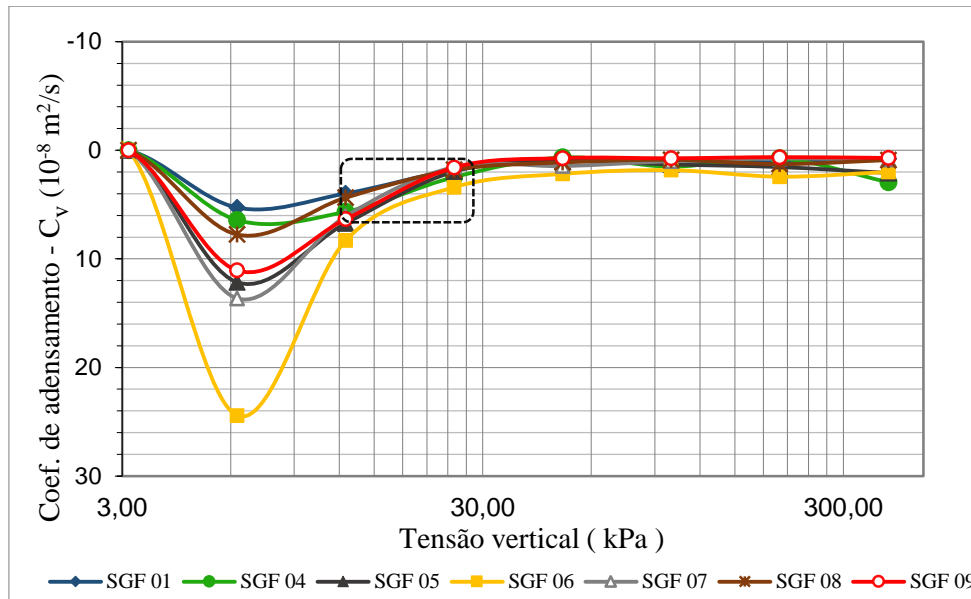


Figura 8.35 – Coeficiente de adensamento vertical (C_v) das tortas retidas nos SGFs em função da tensão vertical, com destaque para a região das tensões de pré-adensamento.

As curvas de compressão plotadas em gráfico com índice de vazios versus tensão vertical efetiva em escala logarítmica (Figura 8.36) permitiram determinar pelo método de Pacheco e Silva as tensões de pré-adensamento (σ'_{vm}) de cada torta retida nos SGFs.

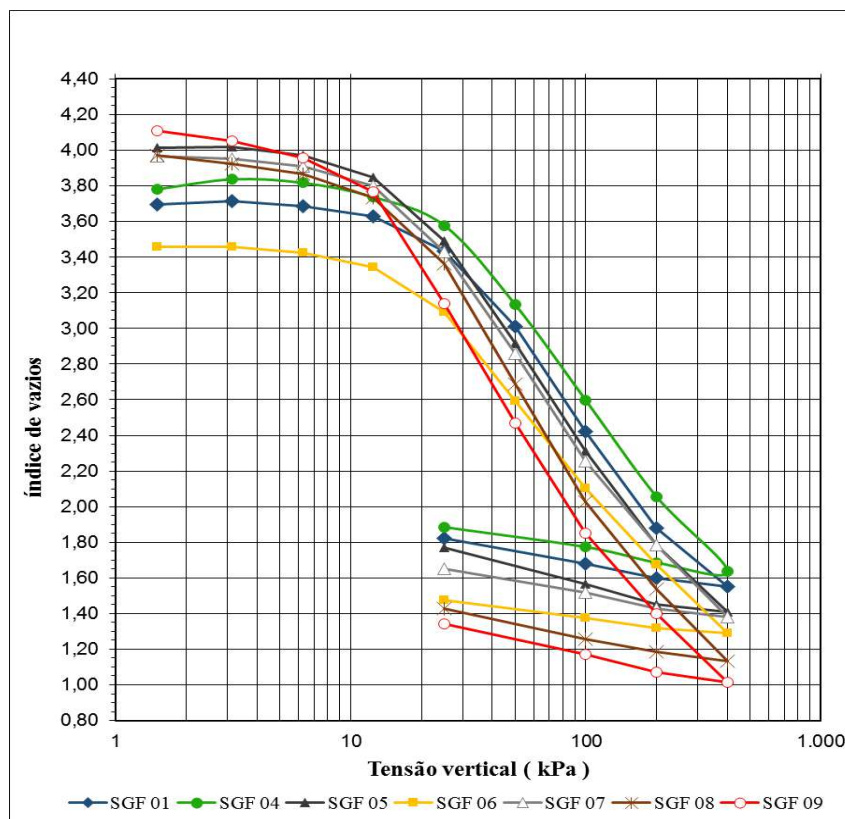


Figura 8.36 – Curvas de compressão das tortas retidas nos SGFs em função do índice de vazios e da tensão vertical em escala logarítmica, para determinação de σ'_{vm} , C_c , C_e e CR

As tensões de pré-adensamento (σ'_{vm}) nas tortas retidas variaram de 12 a 27 kPa, conforme se observa na Tabela 8.5, que contempla ainda o índice de compressão (C_c), índice de expansão (C_s) e a Razão de compressibilidade (CR) para um intervalo de tensão vertical indicado.

Tabela 8.5 – Tensões de pré-adensamento, Coeficientes de compressão e expansão, Razão de compressão e Razão de sobreadensamento para as tortas retidas nos SGFs

Tortas retidas	Tensão de pré-adensamento σ'_{vm} (kPa)	Índice de compressão C_c (m ² /kN) ^a	Índice de expansão C_s (m ² /kN) ^b	Razão de compressão CR (m ² /kN) ^c
SGF 01	27	1,76	0,44	0,38
SGF 04	25	1,76	0,44	0,37
SGF 05	17	1,88	0,64	0,38
SGF 06	19	1,63	0,32	0,37
SGF 07	17	2,01	0,38	0,41
SGF 08	18	2,14	0,41	0,43
SGF 09	12	2,14	0,56	0,42

Notas:

a Índice de compressão (C_c) obtido no intervalo 40 a 100 kPa

b Índice de expansão (C_s) obtido no intervalo de 50 a 110 kPa

c Obtido pela equação $CR = C_c / (1 + e_0)$

Observa-se que as tortas retidas apresentaram compressibilidade elevada com valores de C_c que variaram de 1,76 a 2,14. Uma faixa similar de C_c entre 1,0 e 3,5 foi apresentada por Baroni (2010) para as argilas da baixada de Jacarepaguá. Uma comparação dos C_c obtidos com aquele gerado a partir da correlação com a umidade proposto por Almeida et al. (2008) encontra-se na Figura 8.37, comprovando eficácia na correlação.

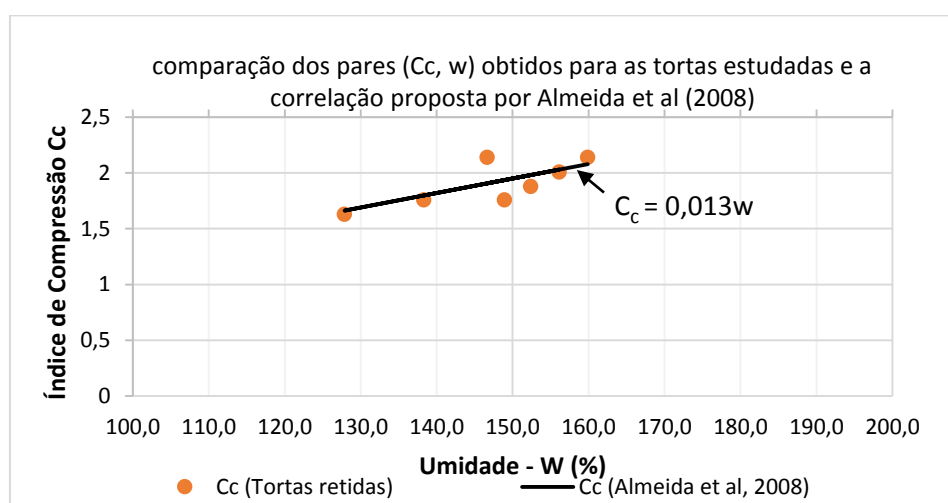


Figura 8.37 – Comparação dos pares (C_c , w) obtidos para as o estudo e correlação proposta por Almeida et al. (2008)

Ao efetuar uma relação da resistência não drenada por meio do S_u/σ'_{vm} e o índice de plasticidade (IP) (Figura 8.38), verifica-se que o valor de $R^2 = 0,1776$ da linha de tendência estabelecida não possibilita a definição de uma correlação pertinente ao estudo. A tentativa de correlação satisfatória também não foi obtida por Baroni, 2016, que por sua vez descreve outras correlações de autores como a de Futai (2010).

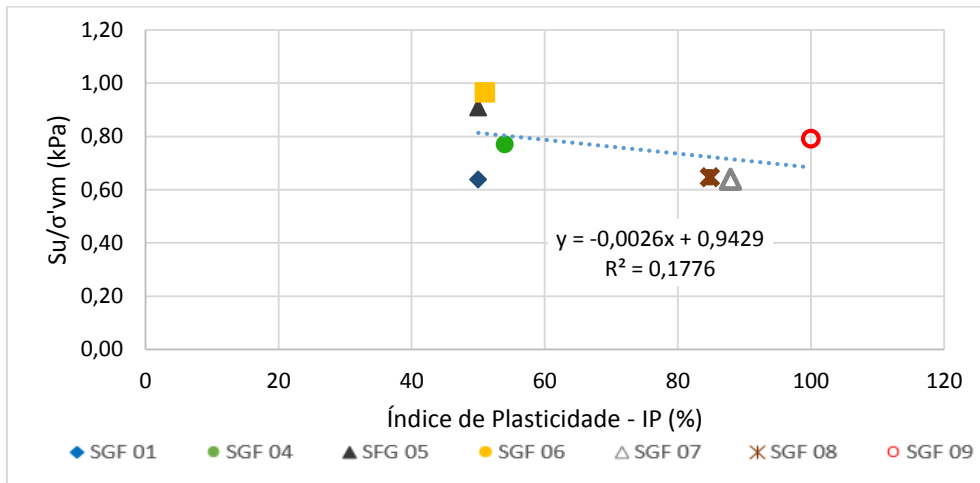


Figura 8.38 – Correlação entre S_u/σ'_{vamp} e o índice de plasticidade (IP) das tortas de sedimentos retidas nos SGFs

O gráfico obtido em função da deformação vertical específica e a tensão vertical efetiva em escala aritmética (Figura 8.39) permitiu definir o módulo oedométrico (E_{oed}) para diferentes faixas de variação da tensão vertical, conforme se visualiza na Figura 8.40.

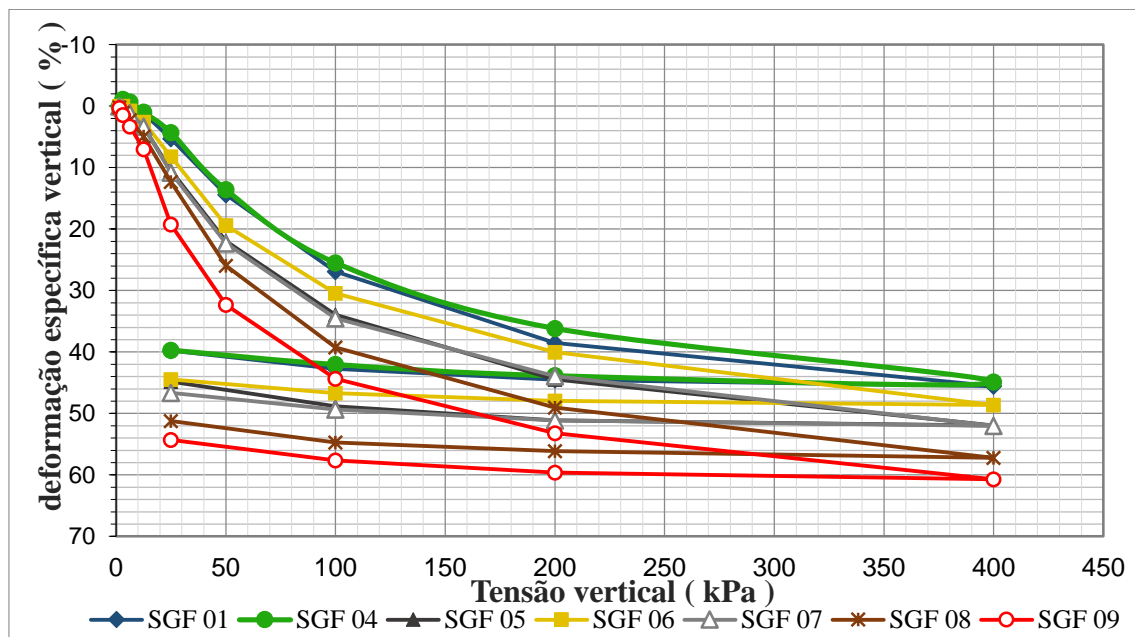


Figura 8.39 – Curvas de compressão das tortas retidas nos SGFs em função da deformação específica vertical (E_v) e da tensão vertical em escala aritmética, para determinação de m_v e E_{oed}

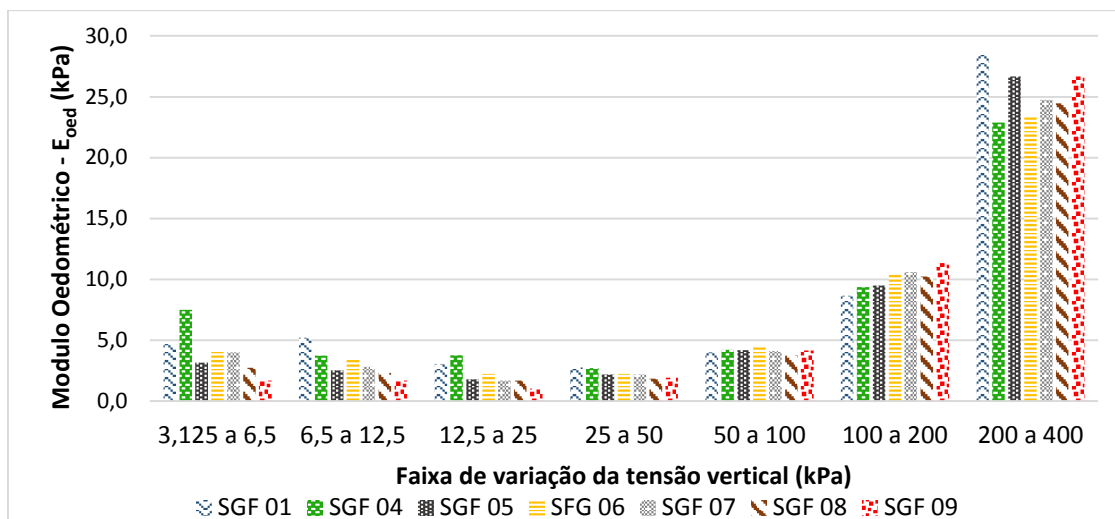


Figura 8.40 – Módulo Oedométrico das tortas retidas nos SGFs por faixa de variação da tensão vertical

Considerando os valores do módulo oedométrico e os valores do coeficiente de adensamento (C_v) para cada faixa de variação da tensão vertical, foi determinado os coeficientes de permeabilidade para as tortas retidas em função da variação da tensão vertical, conforme se observa na Figura 8.41 onde se constata que a permeabilidade das tortas retidas nos SGFs encontra-se na ordem de 10^{-8} m/s e decresce gradativamente a medida que se eleva a tensão vertical.

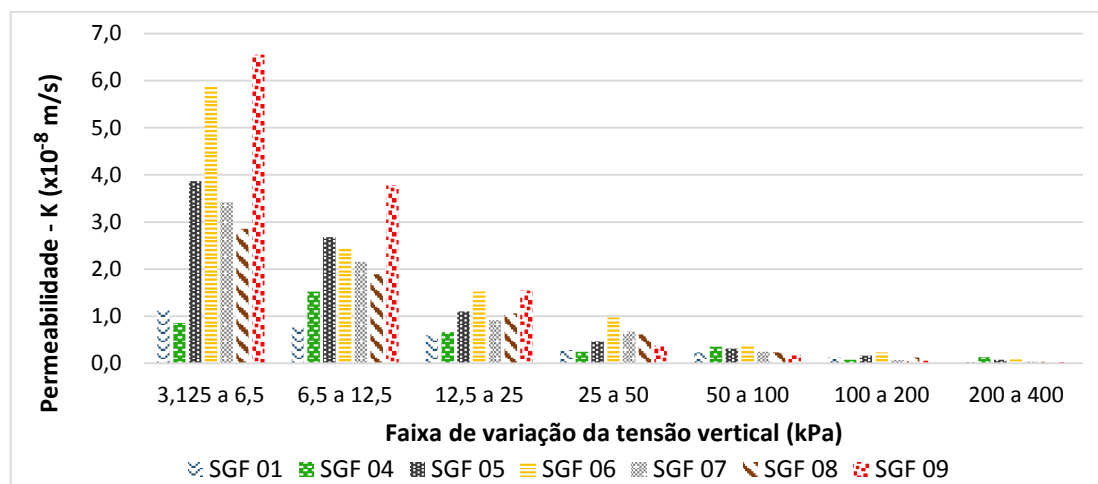


Figura 8.41 – Coeficiente de permeabilidade (k) das tortas retidas nos SGFs por faixa de variação da tensão vertical

Destaca-se que os dados geotécnicos obtidos no presente estudo permitem diversas correlações e equiparações, inclusive abastecem informações para projetos, permitindo previsão de recalque e fornecendo parâmetros para modelagens numéricas, como é o caso do coeficiente de permeabilidade médio.

8.5. CONCLUSÕES PARCIAIS

8.5.1. Dos percolados gerados

A partir dos resultados de parâmetros ambientais dos percolados gerados no processo de desaguamento da lama dragada em SGF, observou-se que:

- Os nutrientes presentes nos percolados, Fósforo total (P-total) e Nitrogênio amoniacal apresentaram uma eficiência de remoção superior a 94% e 55 %, respectivamente. Entretanto, a concentração média de P-total dos percolados provenientes de SGF de enchimento manual ($1,5 \pm 0,7$ mg/l) e a dos percolados de SGF de enchimento bombeado ($0,7 \pm 0,3$ mg/l) apresentaram valores superiores ao detectado na água da lagoa da Tijuca (0,25 a 0,71 mg/l), que por sua vez encontra-se acima do valor de referência de enquadramento de salobra classe 2 (0,186 mg/l). Da mesma forma, valores médios de nitrogênio amoniacal dos percolados provenientes de SGF com enchimento manual ($9,6 \pm 3,7$ g/l) e enchimento bombeado ($7,6 \pm 2,6$ mg/l) encontram-se acima dos valores detectados nas águas da lagoa da Tijuca (0,7 a 0,9 mg/l), que estão ligeiramente superiores ao valor de referência de enquadramento de salobra classe 2 (0,7 mg/l). Diante destes fatos, um tratamento do percolado é importante para não provocar maior eutrofização no corpo hídrico receptor;
- A carga orgânica dos percolados, analisada pela Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO) alcançou eficiência de remoção superior a 98,6% em todos os SGFs. As concentrações médias de DBO e DQO obtidas nos percolados provenientes de SGF com enchimento manual foram de 63,4 mg/l e 182,2 mg/l, respectivamente. Esses valores estão próximos aos obtidos na água da lagoa da Tijuca. Nos percolados dos SGFs de enchimento bombeado os valores foram 100,5 mg/l para DBO e 276,2 mg/l para DQO, superiores provavelmente devido a maior salinidade. Embora esses parâmetros não possuam padrões normativos para lançamento em corpo hídrico, recomenda-se tratamento;
- Os percolados gerados não apresentaram nenhum elemento traço analisado (Pb, Cu, Ni, Zn) acima dos valores permitidos para lançamento em corpo hídrico receptor;

- Os percolados gerados apresentam em média uma condição básica de pH igual a 8,5, com potencial redox (Eh) de aproximadamente 170 mV e condutividade elétrica específica (CEE) de 14,7 mS/cm e 47,1 mS/cm, quando originários dos enchimentos manuais e dos enchimentos bombeados, respectivamente.

8.5.2. Das tortas retidas

Com relação ao resultados de parâmetros ambientais das tortas retidas no SGF foi observado que:

- O Fósforo total (P-total) reduziu cerca de 80% nas tortas de enchimento manual com polímero e nas demais tortas se manteve como o sedimento de origem, cujo concentração média foi $560,1 \pm 123,6$ mg/kg . Esse valor não impede a destinação do material em corpo hídrico (valor de alerta de 2000 mg/kg) e nem sobre o solo;
- O Nitrogênio Kjeldahl Total (NTK) aumentou nas tortas de enchimento bombeado atingindo valores superiores ao valor de alerta de 4.800 mg/kg para disposição em corpo hídrico. Tal fato pode ter ocorrido pelo efeito da elevada condutividade elétrica específica nessas tortas. Nas tortas de enchimento manual a concentração média de nitrogênio Kjeldahl se manteve próxima ao valor médio de $3.371,7 \pm 166,3$ mg/kg do sedimento de origem;
- Os Teores de Carbono Orgânico Total (COT) das tortas retidas apresentaram-se na faixa de 6,4 a 8,7 %, portanto abaixo do valor de alerta de 10% para disposição do material em corpo hídrico. Inclusive, os teores de matéria orgânica das tortas retidas encontram-se entre 10,7 e 14,6%, próximos ao valor médio de $12,9 \pm 1,2\%$ do sedimento de origem;
- Nas tortas retidas apenas o Zinco apresentou concentração superiores a 150 mg/kg (Nível 1) e tal fato ocorreu somente nas tortas provenientes de enchimento bombeado. Provavelmente por influência da condutividade elétrica específica elevada. Os demais elementos traço apresentaram valores levemente inferiores aos detectados nos sedimentos, porém com variação estatisticamente não significativa. Recordar-se aqui que os contaminantes inorgânicos estudados foram os elementos traço: Cobre, Chumbo, Níquel e Zinco, tendo em vista que a série histórica de monitoramento dos sedimentos da lagoa da Tijuca identificou esses metais como aqueles que ultrapassaram os limites de baixa probabilidade de efeito a biota (Nível 1 – resolução nº 454/12 do CONAMA);

- A condutividade elétrica específica (CEE) das tortas retidas encontra-se na mesma ordem de grandeza da que foi observada na lama de dragagem produzida, destacando que nas tortas de enchimento manual o CEE médio foi de 16,3 mS/cm, próximo ao valor encontrado no sedimento de origem e nas de enchimento bombeado alcançou valor médio de 46,0 mS/cm. Certamente esse fato foi devido a diferença da água coletada na primeira e segunda campanha;
- O potencial redox (Eh) das tortas retidas se manteve como a do sedimento de origem, ou seja, na faixa de 265 a 320 mV, indicando condição anóxica que favorece doação de elétrons;
- O potencial hidrogeniônico (pH) das tortas retidas encontra-se entre 3,2 e 3,7 indicando um material com acidez, proporcionando ambiente com possibilidade de liberação de metais dos sulfetos metálicos e dos complexos organometálicos;
- A capacidade troca catiônica (CTC) das tortas retidas apresentou valores na faixa de 91,4 a 112,0 cmol_c/kg para aquelas de enchimento manual e 229,1 a 249,9 cmol_c/kg para as de enchimento bombeado. Entretanto devido a capacidade elétrica específica elevada, esses valores não puderam ser comparados a CTC média de 25,3±1,1 cmol_c/kg obtida no sedimento de origem, onde a salinidade foi retirada com a lavagem do solo para o ensaio.

Por sua vez, a verificação de parâmetros geotécnicos das tortas retidas no SGF permitiram constatar que:

- As tortas provenientes de enchimento bombeado apresentaram maior porcentagem de finos que os sedimentos de origem, provavelmente devido à desagregação das partículas em virtude da turbulência provocada pela bomba hidráulica;
- Ocorreu um aumento não significativo da densidade relativa dos grãos da torta de sedimentos retidos e pode ser justificado pela pequena perda de finos e ligeira redução da matéria orgânica;
- Ocorreu redução do índice de plasticidade das tortas de sedimentos retidos, o que também pode ser compreendida pela perda de finos, especialmente dos argilominerais. Contudo, a salinidade da lama de enchimento bombeado pode ter atenuado essa redução do índice de plasticidade, tendo em vista o incremento da condutividade elétrica específica apenas nessas tortas;

- O teor de sólidos em peso (TSp) das tortas retidas alcançou valores médios de $41,3 \pm 1,4\%$, representando uma eficiência de desaguamento média na ordem de 324% para as tortas de enchimento manual e 297% para aquelas provenientes do enchimento bombeado. Enfatiza-se, que a turbulência do fluxo bombeado prejudicou a floculação, feita a montante da bomba hidráulica, e proporcionou a desagregação de partículas;
- O ganho da resistência não drenada (S_u) das tortas retidas é visível em função do tempo de desaguamento e da redução da umidade. Em 40 dias após o último ciclo de enchimento dos SGFs as tortas provenientes do enchimento bombeado alcançaram umidades próximas de 150% e resistência não drenada (S_u) na faixa de 9,0 a 13,0 kPa, enquanto as tortas oriundas do enchimento manual atingiram umidade média de 135% com resistência não drenada (S_u) entre 15,0 e 20,0 kPa;
- As tortas retidas apresentaram uma tensão de pré-adensamento (σ'_{vm}) na faixa de 12 a 27 kPa e um coeficiente de adensamento (C_v), dentro do domínio normalmente adensado, na ordem de $3,8 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ($1,2 \text{ m}^2/\text{ano}$). A permeabilidade (k) das tortas retidas nos SGFs encontra-se na ordem de 10^{-8} m/s e decresce gradativamente a medida que se eleva a tensão vertical. Entretanto, há de se considerar que durante a secagem as tortas se contraem e geram trincas e fissuras.

9. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este capítulo apresenta as conclusões gerais do trabalho e ao final indica as recomendações para pesquisas futuras.

9.1. CONCLUSÕES GERAIS

Esse trabalho permite ampliar o conhecimento sobre a atividade de dragagem considerando a descrição dos processos e equipamentos empregados nas etapas de escavação, transporte e destinação dos sedimentos.

Observa-se que para a disposição do sedimento de dragagem em ambiente hídrico ou terrestre deve-se verificar as características físicas, químicas e biológicas do sedimento a ser dragado, a forma de escavação e transporte utilizada na dragagem pois interferem no teor de sólidos da lama produzida, e ainda avaliar os impactos previstos pela disposição no ambiente de destino. Esses quesitos mínimos permitem planejar medidas de controle para o processo e ainda propor alternativas ambientalmente mais adequadas, como um tratamento preliminar e até o uso benéfico do material dragado.

O reconhecimento espacial da contaminação permite definir um plano de dragagem com destinações diferenciadas para cada região ou camadas de sedimentos retirados. Os critérios normativos para avaliação do nível de contaminação são estabelecidos com base em valores de referência de substâncias cujas concentrações podem apresentar efeitos adversos.

Na legislação brasileira essas substâncias químicas são agrupadas em cinco categorias: Metais e Semimetais; Tributilestanho; Pesticidas Organoclorados; Bifenilas Policloradas e Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos. O Carbono Orgânico total, Nitrogênio Kjeldahl e Fósforo total também são contemplados no processo de caracterização química tendo em vista que o excesso desses parâmetros pode causar efeitos adversos de eutrofização em corpo hídrico.

Estimulado pelo projeto de recuperação ambiental do Complexo Lagunar de Jacarepaguá, que prevê a dragagem de 4.887.019,0 m³ de sedimentos e o uso de sistema geotêxtil fechado (SGF) como parte de destinação do material dragado, o presente estudo

conduziu inicialmente a pesquisa com a caracterização física e química dos sedimentos da lagoa da Tijuca, responsável por 38% do total de sedimento a ser retirado.

Quanto a caracterização dos materiais

A caracterização permitiu concluir que o sedimento a ser dragado nesta lagoa constitui-se de um solo orgânico de alta plasticidade, cor escura e odor característico, com teor de finos superior a 74% e teor de matéria orgânica equivalente à 12,3%. As concentrações de Fósforo total, Nitrogênio Kjeldahl e Carbono Orgânico total apresentaram-se abaixo de nível de alerta estabelecido pela resolução nº 454/12 do CONAMA, no entanto indicam características de ambiente com interferência antrópica. No que se refere ao nível de contaminação por metais, apenas o cobre apresentou valor acima do nível 1 (aquele de baixo efeito à biota), mas não pode ser considerado representativo estatisticamente.

Os resultados de caracterização da água da lagoa da Tijuca permitem concluir que a água apresenta aspectos de poluição, indicando nutrientes (fósforo e nitrogênio) com valores acima dos padrões definidos pela resolução nº 357/05 do CONAMA para enquadramento de classe 2 - salobra, inclusive os valores de pH e oxigênio dissolvido também encontram-se próximos aos limites do enquadramento.

Quanto ao processo de enchimento e desaguamento no SGF

A mistura do sedimento com a água da lagoa da Tijuca gerou uma lama de dragagem representativa, com um teor de sólidos em peso de 10% , equivalente a um teor de sólido em volume próximo à 4%. Os testes para condicionamento dessa lama conduziram a uma dosagem de 1,7 kg de polímero de poliácridamida catiônica por tonelada de sedimento seco. Desta etapa, conclui-se que a dosagem do polímero e o controle da mistura com a lama são fundamentais para garantir a formação e manutenção dos flocos. Esses elementos são responsáveis por proporcionar eficiência no desaguamento e na filtração de sólidos, principalmente nos primeiros ciclos em que o *filter cake* encontra-se em formação.

Do processo operacional dos experimentos com o sistema geotêxtil fechado conclui-se que o dimensionamento mecânico do sistema se mostrou coerente com os

resultados alcançados no primeiro ciclo do enchimento manual, quando a torta alcançou uma altura próxima de 6 cm ao final do desaguamento deste ciclo inicial.

Embora a altura da torta ao final de cada etapa de desaguamento seja um bom indicador de controle, na operação em campo costuma-se limitar o enchimento até a altura máxima prevista em projeto, que no experimento foi calculada em 23,8 cm. Outra forma de controlar o processo é limitar a vazão e a pressão de entrada no SGF.

O processo com SGF apresentou uma eficiência média de desaguamento na ordem de 324% para o enchimento manual e 297% para o enchimento bombeado, pode-se inferir que a turbulência do fluxo bombeado prejudicou a floculação realizada a montante da bomba hidráulica que promoveu a desagregação de partículas.

Conclui-se que embora a abertura de filtração do tecido geotêxtil utilizado tenha sido de 0,24 mm, foi possível reter material com diâmetro característico de 0,014 mm (D_{90}), enfatizando o efeito do *filter cake* gerado nos 5 ciclos de enchimento.

Quanto ao comportamento ambiental dos percolados gerados

Pode-se concluir que o uso de sistema geotêxtil fechado promove melhoria significativa com eficiência de remoção de sólidos suspensos superior a 98,7%. Ao considerar a eficiência de filtração que equivale a eficiência de remoção dos sólidos totais, verifica-se uma variação entre 65,6% e 92,8%.

As eficiências de remoção média do Fósforo e do Nitrogênio e carga orgânica foram de 94,1, 55,1 e 98,6 % respectivamente. Entretanto, esses percentuais de redução não são suficientes para manter o percolado abaixo dos valores estabelecidos como limite de enquadramento classe 2 - salobra. Portanto, mesmo que nenhum elemento traço analisado tenha apresentado valores acima dos estabelecidos pela resolução nº 430/11 do CONAMA para lançamento de efluentes, um tratamento do percolado é recomendado para não provocar eutrofização no corpo receptor.

Quanto ao comportamento ambiental das tortas retidas

Conclui-se que o Nitrogênio Kjeldhal total e o Zinco são os elementos que apresentaram características acima das estabelecidas pela resolução nº 454/12 do CONAMA para lançamento do material em corpo hídrico de forma irrestrita. Tal fato ocorreu apenas para as tortas de enchimento bombeado, ou seja, aquelas cujas lamas foram formadas com água de maior salinidade.

Ressalta-se que as concentrações de metais foram obtidas conforme a resolução nº 454/12 do CONAMA, que recomenda o procedimento analítico de digestão parcial na fração total do sedimento. Contudo, os valores orientadores nela indicados são originários das diretrizes de qualidade de sedimento norte-americanas, que compilaram concentrações de metais traço relativas à procedimentos de extração total da fração fina de sedimentos não tropicais. Esse fato demonstra a fragilidade da comparação, geralmente, subestimando as concentrações obtidas (digestão parcial da fração total) com relação aos valores orientadores estabelecidos (digestão total de fração fina).

As resoluções nº 420/09 e nº 454/12 do CONAMA estabelecem que para destinação em corpo hídrico, a unidade de disposição confinada é requerida quando valores de metais são superiores ao nível 2 ou quando análises ecotoxicológicas indicarem 50% ou mais organismos com efeitos tóxicos. Para destinação em terra, a unidade de disposição confinada é requerida quando os metais apresentarem concentrações superiores aos valores de investigação industrial. Os metais não atingiram esses valores nos sedimentos e nem nas tortas geradas, permitindo destinação menos criteriosa. No entanto, quando se considera que as tortas retidas foram classificadas como um resíduo Classe II-A (não inerte) a destinação requer condições mais restritivas. Isso evidencia que a norma brasileira de dragagem é mais permissiva e deve ser revisada especialmente na forma de extração do metal e na fração analisada.

Quanto ao comportamento geotécnico das tortas retidas

Conclui-se que o processo de desaguamento da lama em SGF promove um ganho de resistência não drenada na torta retida, alcançando valores na ordem de 16,0 kPa quarenta dias após o último ciclo de enchimento, quando a umidade média chega a 150%, equivalente a um teor de sólido em peso próximo a 40%.

Após o mesmo período, a torta retida apresenta a tensão de pré-adensamento (σ'_{vm}) na faixa de 12 a 27 kPa e um coeficiente de adensamento (C_v), dentro do domínio normalmente adensado, na ordem de $3,8 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ($1,2 \text{ m}^2/\text{ano}$). A permeabilidade (k) apresenta-se na ordem de 10^{-8} m/s e decresce gradativamente a medida que se eleva a tensão vertical.

9.2. RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Dentro do sentido de melhoria contínua, as recomendações visam complementar e ampliar o estudo desenvolvido neste trabalho. Portanto, propõe-se:

- Verificar a viabilidade de uso benéfico da torta retida, seja no próprio sistema geotêxtil fechado como um elemento de obra de engenharia, como material de insumo para construção e pavimentação; e até mesmo como uso agrícola considerando as características de matéria orgânica e nutrientes presentes;
- Estudar o comportamento do sistema geotêxtil fechado quanto à retenção de outros parâmetros, como os Hidrocarbonetos e as Bifenilas Policloradas;
- Realizar ensaios ecotoxicológicos nos sedimentos que apresentarem características requisitadas pela resolução nº 454/12 do CONAMA.
- Fazer balanço de massa dos parâmetros analisados considerando as concentrações e quantidade equivalentes a entrada e saída do SGF;
- Efetuar novas correlações no que se refere ao comportamento mecânico do sistema geotêxtil fechado afim de obter elementos para melhoria no desempenho operacional do processo;
- Promover experimento em escala piloto durante o efetivo processo de dragagem das lagoas do complexo lagunar de Jacarepaguá.

Como forma de ampliar o uso desta tecnologia no Brasil, deve-se estudar outras configurações do sistema geotêxtil fechado, envolvendo: geotêxtil não tecido e bolsas duplas (tecido e não tecido), maior variação na pressão, outros critérios de condicionamento e teores de sólidos da lama, bem como a utilização de materiais com fontes e granulometrias diferenciadas, lembrando da importância de ajustar à estudos de casos específicos.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, J. E.; MARINS, R. V.; ALMEIDA, M. D. "Comparação de metodologias de digestão de sedimentos marinhos para caracterização da geoquímica de metais-traço na plataforma continental nordeste oriental brasileira", *Geochimica Brasiliensis*, v. 21, n. 3, p. 304–323, 2007.

AGUIAR, O. A. *Dragagem por resultados*. São Vicente, SP. Editora Fundação Plural, 2013.

ALCÂNTARA, P. B. *Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados*. Tese de DSc, UFPE. Recife, PE, 2007.

ALEXANDRE, M. R.; HUANG, Y.; MADUREIRA, L. A. S. "Avaliação de compostos orgânicos em sedimentos superficiais da baía de Babitonga, Santa Catarina, Brasil", *Geochimica Brasiliensis*, v. 20, n. 2, p. 208–218, 2006.

ALMEIDA, G. C. P. DE. *Caracterização Física e Classificação dos Solos*. Juiz de Fora, MG, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2005.

ALMEIDA, M. S. . et al. "Laboratory behavior of Rio de Janeiro soft clays. Part 1: Index and compression properties", *Soils and Rocks*, v. May-August, n. 31(2), p. 69–75, 2008.

ALMEIDA, M. S. S.; BORMA, L. S.; BARBOSA, M. C. "Land disposal of river and lagoon dredged sediments". *Engineering Geology*, v. 60, p. 21–30, 2001.

AMORIM, A. B. B. D. *Aplicação do método de valoração contingente para estimar o valor econômico do sistema lagunar de Jacarepaguá*. Monografia de Engenharia ambiental. UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2015.

ANA. *Portal da Qualidade das Águas. Indicadores de Qualidade - Índice de Qualidade*. Disponível em: <http://portalpnqa.ana.gov.br/indicadores-indice-aguas.aspx#_ftn1>. Acesso em: 7 feb. 2016.

ARARUNA JÚNIOR, J. T. et al. "Sediments Quality Assessment of Jacarepaguá Lagoon: The Venue of the 2011 Rock in Rio" *Clean - Soil, Air, Water*, v. 40, n. 9, p. 906–910, 2012.

ARAÚJO, R. E. T. DE. *Urbanização da baixada de Jacarepaguá, degradação dos corpos hídricos e saúde pública: Os casos da hepatite A, da Leptospirose e da esquistossomose*. Dissertação de MSc, UFF, Niterói, RJ, 2007.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 13370: Não Tecido - Terminologia*, Rio de Janeiro. Brasil, 2017.

AUSTRALIA. Department of the Environment, Water, Heritage and the Arts . *National Assessment Guidelines for Dredging*, Commonwealth of Australia, Canberra, 2009.

AZEVEDO NETTO, J. M. DE. *Manual de Hidráulica*. 8º edição, São Paulo, SP, Editora

Blucher, 1998.

BARONI, M. *Comportamento geotécnico de argilas extremamente moles da baixada de Jacarepaguá*, RJ. Tese de DSc, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2016.

BARRETT, R. J. "Use of plastic filters in coastal structures. In: *10th conference on Coastal Engineering*. p.1048-1067, Tokyo, Japan, 1966.

BENEDETTI, P. E. *Caracterização geoambiental dos sedimentos da lagoa de Jacarepaguá, RJ*. Dissertação de MSc, PUC-RIO, Rio de Janeiro, RJ, 2011.

BEZUIJEN, A.; VASTENBURG, E. W. *Geosystems Design rules and applications*. London, UK. Taylor & Francis, 2013.

BHATIA, S. K.; SATYAMURTHY, R. "Effect of polymer conditioning on dewatering characteristics of fine sediment slurry using geotextiles", *Geosynthetics International*, v. 16, n. 2, p. 83–96, 2009.

BIDONE, E. D. et al. *Custo sócio-econômico de dragagens portuárias*. In: BOLDRINI, E. B.; PAULA, E. V. DE (Eds.). *Gestão Ambiental Portuária-Subsídios para o licenciamento das dragagens*. 1. ed. Curitiba/PR: ADEMADAN, p. 75–88, 2009.

BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. *Conceitos básicos de resíduos sólidos*. São Carlos, SP, 1999.

BORMA, L. DE S. *Acidificação e liberação de metais pesados em sedimentos dragados ricos em sulfetos de Fe*. Tese de DSc, UFRJ, Rio de Janeiro, 1998.

BORTONE, G.; PALUMBO, L. *Sustainable management of sediment resources. Sediment and dredged material treatment*. v.2, first edition. Amsterdam, Elsevier, 2007.

BRAGA, P. F. A.; FRANÇA, S. C. A. *Tratamento de sedimentos do Canal do Fundão para descarte em geobags*. In: XXIII Encontro Nacional de Tratamento de minérios e Metalurgia Extrativa - ENTMME. Gramado, RS, 2009.

BRASIL, CONAMA. Resolução nº 454 de 01 de novembro de 2012. *Estabelece diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional*. DOU, 2012.

BRASIL, CONAMA. Resolução nº 01 de 23 de janeiro de 1986. *Dispões sobre critérios básicos e diretrizes para a avaliação de impacto ambiental*. DOU, 1986.

BRASIL, CONAMA. Resolução nº 357 de 17 de março de 2005. *Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento*. DOU, 2005.

BRASIL, CONAMA. Resolução nº 420 de 28 de dezembro de 2009. *Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo*. DOU, 2009.

BRASIL, CONAMA. Resolução nº 430 de 13 de maio de 2011. *Dispõe sobre as*

condições e padrões de lançamento de efluentes. DOU, 2011.

BRAY, R. N. *Environmental Aspects of Dredging*. Londown, UK, Taylor & Francis, 2008.

BRAY, R. N.; BATES, A. D.; LAND, J. M. *Dredging: A handbook of engineers*. Second edition, Londown, UK, Butterworth-Heinemann, 1997.

CALHEIROS, A. L. DOS S. *Variações do nível relativo do mar nos últimos 7.000 anos a.p. na planície costeira de Jacarepaguá, Rio de Janeiro*. Dissertação de MSc, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2006.

CANTRÉ, S.; SAATHOFF, F. "Design parameters for geosynthetic dewatering tubes derived from pressure filtration tests", *Geosynthetics International*, v. 18, n. 3, p. 90–103, 2011.

CARVALHO, N. DE O. et al. *Guias de Práticas sedimentométricas*. Brasília, DF. ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, 2000.

CASTIGLIA, M. C. C. P. *Disposição subaquática de rejeitos de dragagem: O caso do complexo lagunar de Jacarepaguá*. Dissertação de MSc, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2006.

CASTRO, N. P. B. DE. *Sistema tubular para contenção de lodo e sedimento contaminados*. Dissertação de MSc, ITA, São José dos Campos, SP, 2005.

CASTRO, N. P. B. D. et al. "Tests to Evaluate Dewatering and Filtration Efficiency for Geotextile Tubes Design", In: *Geosynthetics 2009*, Salt Lake, Utah, 2009.

CEDAE - Companhia Estadual de Águas e Esgotos. *Programa de saneamento da barra da tijuca, recreio dos bandeirantes e Jacarepaguá*. Rio de Janeiro, RJ, 2016.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Guia nacional de coleta e preservação de amostras. águas, sedimento, comunidades aquáticas e efluente líquidos*. Brasília, DF, 2011.

CHRISTOPHER, B. R.; FISCHER, G. R. "Geotextile filtration principles, practices and problems", *Geotextiles and Geomembranes*, v. 11, n. 4–6, p. 337–353, 1992.

COPPETEC - Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos. *Elaboração do plano estadual de recursos hídricos do estado do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro, RJ, 2014.

CRUZ, F. ; OLIVEIRA, A. C. P. DE; GÔMARA, G. . "Monitoramento da Comunidade de Cianobactérias no Complexo lagunar de Jacarepaguá no período de 2011 a 2012", *Revista Eletrônica Novo Enfoque*, v. 15, p. 90–95, 2012.

CYPRIANO, E. F. *Distribuição espacial de mercúrio nos sedimentos do complexo lagunar da baixada de Jacarepaguá, RJ*, Monografia de Oceanografia, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, 2009.

DHOLLANDER, J. "Environmental dredging for an efficient removal of contaminated sediments". *Arab Construction World (ACW)*, vol. XXXIV, issue 4, April, 2016.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. *Métodos e Técnicas de Tratamento de Água*. São Carlos, SP, RIMA, 2005.

DIAS, C. P. "Bacia de Jacarepagua - Macrodrenagem: um grande projeto" In: *XX Congresso brasileiro de engenharia sanitária e ambiental*. Rio de Janeiro, RJ, 1999.

DOLABELLA, R. DE M. *Estudo de parâmetros geotécnicos e do comportamento reológico de amostras de argila do pré-sal*. monografia de Engenharia Civil, UFRJ, Rio de Janeiro, 2017.

DOMINGUES, A. C. D. G. *Teor de metais pesados em solo contaminado com resíduo de sucata metálica, em função de sua acidificação*. Dissertação de MSc, Instituto Agrônômico, Campinas, SP, 2009.

EISMA, D. *Dredging in coastal waters*. Londown, UK, Taylor & Francis, 2005.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Manual de métodos de análise de solo*. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ, 1997.

ESPÓSITO, T. DE J. *Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico*. Tese de DSc, UnB, Brasília, DF, 2000.

FALCÃO, M. M. *Estudo da Circulação Hidrodinamica no Sistema Lagunar de Jacarepaguá*. Dissertação de MSc, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1995.

FERNANDES, H. S. M. *Abordagem geoquímica no estudo da poluição por metais pesados nos sistemas fluvial e lagunar da baixada de Jacarepaguá-RJ*. Dissertação de MSc, UFF, Niterói, RJ, 1991.

FERREIRA, F. P. D. M.; CUNHA, S. B. DA. "Enchentes no Rio de Janeiro: Efeitos da urbanização no Rio Grande (Arroio Fund) - Jacarepaguá", *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 19, p. 79-92, 1996.

FONTES, M. P. F.; CAMARGO, O. A. DE; SPOSITO, G. "Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados", *Scientia Agricola*, v. 58, n. 1972, p. 627-646, 2001.

FOWLER, J.; STEPHENS, T. *Proposed ASTM Standard Method - Standard Test Method for Determining the Flow Rate of Suspended Solids from a Geotextile Containment System for Dredged Material*. Pendergrass, GA, 1993.

FREIRE, I. DE S. *Reologia escoamento e deformação da matéria*. Centro de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico - CDT, UnB, Brasília, DF, 2012.

FREITAS, A. M. DE. *Qualidade das águas fluviais: estudo de caso da bacia hidrográfica de Jacarepaguá - RJ*. Dissertação MSc, UERJ, Rio de Janeiro, 2009.

FREITAS, M. B. DE. *Tratamento de água para consumo humano*. Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, RJ, 2001.

GOES FILHO, H. DE A. *Dragagem e Gestão dos Sedimentos*. Dissertação de MSc, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2004.

GREENWOOD, J. H.; JOHN H.; SCHROEDER, H. F.; VOSKAMP, W. *Durability of geosynthetics*. first edition, Netherland, CRC press Taylor & Francis Group, 2012.

GSI - Geosynthetic Institute. *GRI Test Method GT10: Test Methods, Properties and Frequencies for High Strength Geotextile Tubes used as Coastal and Riverine Structures*, Pennsylvania, USA, 2012.

GUIMARÃES, M. G. A.; URASHIMA, D. C. "Dewatering sludge in geotextile closed systems: Brazilian experiences", *Soils and Rocks*, v. 36, n.3, p. 251–263, 2013.

HAKSTEGE, A. L. "Description of the available technology for treatment and disposal of dredged material", *Sustainable management of sediment resources*, v.2, p. 68–118, 2007.

HOODA, P. S. *Trace elements in soil*. Chichester, U.K, John Wiley & Sons, 2010.

HOWARD, I. L. *Use of geotextile and geomembrane tubes to construct temporary walls in a flooded area*. Tennessee, USA, U.S. Department of Energy, 2011.

HUESKER. *Rotina de ensaio de mini-funil*, São José dos Campos, SP, 2013.

IADC - International Association of Dredging Companies. *Dredging for development*. Bray & Cohen. New Jersey, USA, 2010.

IMO - International Maritime Organization. *Guidelines on the Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of waste and Other Matter*, 1972. London, U.K, IMO Publication, 2006.

INEA - Instituto Estadual do Ambiente. Planilha de monitoramento das Estações de Amostragem do Complexo Lagunar de Jacarepaguá. Rio de Janeiro, RJ, 2015.

JARA, S. M. Análise das mudanças espaço-temporais na lagoa da tijuca e o papel da faixa marginal de proteção. Dissertação de MSc, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2014.

JARDIM, W. F.; CANELA, M. C. *Fundamentos da oxidação química no tratamento de efluentes e remediação de solos*, Caderno Temático, Volume 1, Campinas, SP, UNICAMP, 2004.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. *Tratamento de esgotos domésticos*. 7. ed. Rio de Janeiro, RJ, ABES, 2013.

KHACHAN, M. M. et al. "Cationic starch flocculants as an alternative to synthetic polymers in geotextile tube dewatering", *Geosynthetics International*, v. 21, n. 2, p. 119–136, 2014.

KOERNER, R. M. *Designing with Geosynthetics*. 6th. ed. New Jersey, USA: Xlibris Corporation, 2012.

KOFFLER, A. VAN DEN BERG, G. "A new approach to dewatering contaminated sediments." *Proceedings International Symposium on Sediment Management*, Lille, France, July, pp. 597-601, 2008.

LAWSON, C. R. "Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering". In: *8th International Conference on Geosynthetics*, Yokohoma, Japan, 2006

LAWSON, C. R. "Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering", *Geosynthetics International*, v. 15, n. 6, p. 384-427, 2008.

LERNER, H. M. *Tratamento biológico de lodo de dragagem para aproveitamento como aterro*. Dissertação de MSc, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2000.

LESHCHINSKY, D. et al. "Geosynthetic tubes for confining pressurized slurry: some design aspects". *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 122, n. 8, p. 682–690, 1996.

LI, Shaowu ; JI, Zezhou ; WU, Qingwei ; SHI, Yang. . "Estimation of dynamical forces on turbidity curtain in combined wave-current flow". *Journal of Coast Research*, v. 85, p. 1181-1186, May 2018.

LIAO, K.; BHATIA, S. K. "Geotextile tube: filtration performance of woven geotextiles under pressure". In: *North American Geosynthetic Conference*. USA, 2005.

LIM, L.K., YEE, T.W., DING, L., WANG, Z.Y. AND XIA, Y. "Geotextile containment and dewatering technology for disposal of dredged contaminated sediments". *Proceedings Fourth International Congress for Dredging Technology Development*, Chongqing, China, November, 12pp, 2011.

MANAP, N; VOULVOULIS, N. "Data analysis for environmental impact of dredging". *Journal of Cleaner Production*, v. 137, n. 8, p. 394–404, 2016.

MARTINS, P. D. M.; VIDAL, D. D. M. "Tubos Geotêxteis para acondicionamento e desaguamento de rejeitos de mineração. In: *XII ENCITA*. São José dos Campos, SP, 2006

MARTINS, P. DE M. *Utilização de tubos geotêxteis para o desaguamento de rejeitos de mineração*. Dissertação de MSc, ITA, São José dos Campos, SP, 2006.

MASSAD, F. *Mecânica dos solos experimental*. São Paulo, SP, Oficina de Textos, 2016.

MASTERPLAN consultoria de projetos e meio ambiente. *Relatório Ambiental Simplificado (RAS) das Obras de Recuperação Ambiental do Complexo Lagunar de Jacarepaguá*. Rio de Janeiro, RJ, 2013.

MASTERPLAN consultoria de projetos e meio ambiente. *Plano Básico Ambiental (PBA) das Obras de Recuperação Ambiental do Complexo Lagunar de Jacarepaguá*. Rio de Janeiro, RJ, 2014.

MASTERPLAN consultoria de projetos e meio ambiente. *Estudo de Impacto Ambiental (EIA) das Obras de Prolongamento do enrocamento (molhe) existente na entrada do canal da Joatinga e as melhorias da circulação hidrica do Complexo Lagunar de Jacarepaguá*. Rio de Janeiro, RJ, 2015. disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/documents/document/zwew/mtew/~edisp/inea0110415.pdf>> Acesso em: 10 mar 2016.

MASTIN, B. J.; LEBSTER, G. E.; SALLEY, J. R. "Use of Geotextile Tube Dewatering Containers in Environmental Dredging: . In: *The First Pan American Geosynthetics Conference & Exhibition*, Cancun, México, 2008.

MASUTTI, M. B. *Distribuição e efeitos de cromo e cobre em ecossistemas aquáticos : uma análise laboratorial e in situ*, Tese de DSc, UFScar, São Carlos, SP, 2004.

MAURER, B. W. et al. "Geotextile dewatering of flocculated, fiber reinforced fly-ash slurry", *Fuel*, v. 97, p. 411–417, 2012.

MCANALLY, W. H.; ADAMEC, S. A. "Designing open water disposal for dredged muddy sediments", *Continental Shelf Research*, v. 7, n. 11–12, p. 1445–1455, Nov, 1987.

MCCABE, WARREN L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. *Unit operations of chemical engineering*. McGraw-Hil, 1993.

MELO, L. C. Q. C. et al. "Remediation of the Contaminated Sediments Dredged from Rio de Janeiro Port". In: *Second Pan American Geosynthetics Conference & Exhibition GeoAmericas*. Lima, Perú, 2012.

MESTRINHO, S. S. P. *Conceptos básicos y estudio de caso en Iberoamérica*. México, Piriguazú Ediciones, 2006.

MIKI, M. K. *Utilização de polímeros para condicionamento de lodo de ete para desidratação em filtro prensa de placas*. Dissertação de MSc, USP, São Paulo, SP, 1998.

MONTEIRO, A. M. *Estudo das técnicas de disposição de sedimentos contaminados de dragagem*. Dissertação de MSc, IME, Rio de Janeiro, RJ, 2010.

MONTEIRO, A. M.; MARQUES, J. CARLOS CESAR AMORIM; M. ESTER SOARES. "Disposição de sedimentos contaminados de dragagem em tubos geotêxteis", *revista C&T*, 3º Trimestre, p. 3–12, 2014.

MONTEIRO, M. T. *Fitorremediação de Rejeito Contaminado Proveniente do Canal do Fundão, na Baía da Guanabara-RJ*. Tese de DSc, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2008.

MOO-YOUNG, H. K.; TUCKER, W. R. "Evaluation of vacuum filtration testing for geotextile tubes", *Geotextiles and Geomembranes*, v. 20, n. 3, p. 191–212, Jun. 2002.

MORAIS, A. *Análise de alternativas hidrodinâmicas para o sistema lagunar da Baixada de Jacarepaguá*. Dissertação de MSc, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

- NUNES, J. A. *Tratamento físico químico de águas residuárias industriais*. 3º Edição, Aracaju, SE. Editora Triunfo Ltda, 2001.
- NUVOLARI, A. et al. *Esgoto Sanitário: coleta, transporte, tratamento e reúso agrícola*. São Paulo, SP, Editora Edgard Blucher Ltda, 2003.
- ORTIZ, R. N.; JUNIOR, O. S.; LADCHUMANANANDASIVAM, R. "Tubos de geotêxtil aplicados a obras de defesa costeira". In: *II Congresso sobre Planejamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*, Recife, PE, 2003.
- PALERMO, M. et al. "USACE technical guidelines for environmental dredging of contaminated sediments" In: *U.S. Army Engineer Research and Development Center - Environmental Laboratory*. Vicksburg, MS, USA, 2008
- PAPENMEIER, S. et al. "Sedimentological and rheological properties of the water–solid bed interface in the weser and ems estuaries, north sea, Germany: Implications for fluid mud classification". *Journal of Coastal Research*, v. 289, n. 4, p. 797–808, 2013.
- PAULA, E. H. DE. *Estudo Experimental do Transporte e retenção de Zn e Cu em solo arenoso de Jacarepagua, Rio de Janeiro*. Dissertação de MSc, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1999.
- PAVANELLI, G. *Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na Coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada*. Dissertação de MSc, UFSCAR- USP, São Carlos, SP, 2001.
- PEDROZA, M. et al. "Produção e tratamento de lodo de esgoto—uma revisão". *Revista Liberato*, v. 11, n. 16, p. 89–188, 2010.
- PIANC - Permanent International Association of Navigation Congresses. *Beneficial uses of dredged material. A Pratical Guide*. Brussels, Belgium, 1992.
- PIEPER, K. M. C. *Avaliação do uso de geossintético para o deságue e geocontenção de resíduos sólidos de estação de tratamento de água*. Dissertação de MSc, UFRGS, Porto Alegre, RS, 2008.
- PILARCZYK, K. W. *Geosynthetics and Geosystems in hydraulic and Coastal Engineering*. Delft, Netherlands, 2000.
- PILARCZYK, K. W.; BRETELER, M. K.; STOUTJESDIJK, T. "Stability criteria for geosystems: an Overview. In: sixth *International Conference on Geosynthetics*. p. 1165-1172, Atlanta, Georgia, USA, 1998.
- PINTO, C. DE S. *Curso Básico de Mecânica dos Solos*. 3ª edição, São Paulo, SP, Oficina de Texto, 2006.
- PROJCONSULT Engenharia Projetos Ltda. *Relatório do Projeto Básico de Recuperação Ambiental do Complexo Lagunar da Baixada de Jacarepaguá*. Rio de Janeiro, RJ, 2011.
- RADERMACHER, M. *Effectiveness of Silt Screens*. Master's Degree. Delft University

of Technology, Netherlands, 2013.

RAMALHO, M. J. DE A. C. *Otimização de um Processo de Coagulação-Floculação na ETE de Icaraí, Niterói*. Dissertação de MSc. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2013.

REBELO, L. P. *Diagnóstico da qualidade da água do complexo lagunar de Jacarepaguá de 2001 a 2015. monografia de Engenharia Ambiental*, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2016.

RIBEIRO, L. F. M. *Simulação física do processo de formação dos aterros hidráulicos aplicado a barragens de rejeitos*. Tese de DSc em Geotecnia, UnB, Brasília, DF, 2000.

RIGUETTI, A. L. *Avaliação espaço-temporal do grau de trofia em lagoas costeiras da cidade do Rio de Janeiro: Aplicação de Índices de Estado Trófico*. Dissertação de MSc em Química Ambiental, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, 2009.

ROBECK, S. *Estudo Da Permissividade E Permeabilidade De Geotêxteis Não Tecidos De Poliéster Impregnados Com Materiais Asfálticos Submetidos À Elevada Carga Hidráulica*. Dissertação de MSC em Engenharia Civil, UFPR, Curitiba, PR, 2015.

RONQUIM, C. C. "Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para regiões tropicais". *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*, v. 8, p. 26, 2010.

ROSMAN, P. C. C. "Ligação lagoa-mar, uma necessidade". *Oecologia Australis*, v. 16, n. 3, p. 651–693, 2012.

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. *Norma Técnica SABESP NTS 233: Polímeros Orgânicos base poliacrilamida para tratamento em ETAs e ETEs - Método de ensaio*, São Paulo, SP, 2006.

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. *Norma Técnica SABESP NTS 301: Saco geotêxtil para desagumamento de lodo*, São Paulo, SP, 2015.

SALLOTO, G. R. B. et al. "Pollution Impacts on Bacterioplankton Diversity in a Tropical Urban Coastal Lagoon System". *Plos One*, v.7, n.11, p 1-12, 2012.

SAMPAIO, G. F. *Cianobactérias Como Parâmetro De Qualidade Ambiental: Um Estudo Do Complexo Lagunar De Jacarepaguá*. Dissertação de MSc em Engenharia Ambiental, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, 2008.

SANTOS, A. C. B. DOS. *Avaliação do crescimento de polímeros na disposição de sedimentos dragados*. Dissertação de MSc em Engenharia Civil, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2001.

SANTOS, A. C. B. DOS; ALVES, M. C. M. "Redução do volume de resíduos de dragagem através de processo físico-químico". In: *XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, n. 1, p. 1-8, 2001.

SANTOS, M. R. DOS. *Evolução temporal da eutrofização no complexo lagunar de Jacarepaguá*. Monografia de Engenharia Ambiental, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2014.

SCHAEFER, G. L. *Retenção e liberação de fósforo em sedimento de fundo de açudes e córregos de pequenas bacias hidrográficas em um assentamento de reforma agrária*. Dissertação de MSc em ciências do solo, UFSM, Santa Maria, RS, 2015.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. *Ensaio de Campo e suas Aplicações à Engenharia de Fundações*. São Paulo, SP, Oficina de Textos, 2012.

SHIROMA, P. H. *Estudo do comportamento reológico de suspensões aquosas de bentonita e cmc: influência da concentração do NaCl*. Dissertação de MSc em Engenharia Química, USP, São Paulo, SP, 2012.

SHIRZAD-SEMSAR, M.; SCHOLZ, S.; KULICKE, W. M. "Cationic starches as substitute for synthetic cationic flocculants in solid-liquid separation of harbor sludge". *Journal of Physical Chemistry B*, v. 111, n. 29, p. 8641–8648, 2007.

SILVA, A. M. DA. *Abertura de Filtração de Geotêxteis sob Confinamento*. Dissertação de MSc em Geotecnia, UnB, Brasília, DF, 2014.

SILVA, G. "Processo de Ocupação Urbana da Barra da Tijuca (RJ): Problemas Ambientais, Conflitos Sócio-Ambientais, Impactos Ambientais Urbanos". *Pesquisa em arquitetura e construção*, n. iii, p. 28p., 2006.

SILVEIRA, A. E. F. *Índice de risco para gestão de dragagem em ambientes costeiros: estudo de caso da baía de Guanabara, Rio de Janeiro, Brasil*. Dissertação de MSc em Geoquímica Ambiental, UFF, Niterói, RJ, 2016.

SMAR - Secretaria Municipal de Saneamento e Recursos Hídricos do Rio de Janeiro. *Plano municipal de saneamento básico da cidade do Rio de Janeiro. Dragagem e Manejo de águas pluviais urbanas*. Rio de Janeiro, RJ, 2015.

SMITH, M. "Geotextile Tubes in Environmental Applications". In: *International Conference on Geosynthetics*, 2017.

SOARES, C. R. L. *Avaliação do processo de dragagem por injeção de água em estuários*. Dissertação de MSc em Engenharia Oceânica, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2006.

SOUTO, G. D. DE B. *Lixiviado de aterros sanitários brasileiros - estudo de remoção do nitrogênio amoniacal por processo de arraste com ar ("stripping")*. Tese de DSc em Engenharia Hidráulica e Saneamento. UFSCAR, São Carlos, SP, 2009.

SOUZA, J. F. DE; RICCIO, M. V. F.; ALMEIDA, M. "Destinação dos resíduos de dragagem com observância de parâmetros geotécnicos e ambientais no processo de licenciamento". In: *9^{as} Jornadas Técnicas Internacionais de Resíduos*. Viana do Castelo, Portugal, 2015.

STEPHENS, T. "Beneficial use of contaminated sediments – 3 case histories." *Proceedings Battelle Seventh International Conference on Remediation of Contaminated Sediments*, Dallas, USA, February, Battelle, 30pp, 2013.

STEPHENS, T., MELO, L.C.Q.C. AND FUTAI, M.M. "Beneficial use of dredged

contaminated sediments using geotextile tube technology at a container port in Santos, Brazil." *Proceedings Geosynthetics 2013*, Long Beach, USA, April, pp. 490-495, 2013.

STEPHENS, T., MELO, L.C.Q.C., CASTRO, N.P.B. AND MARQUES, A.C.M. "Canal do Fundão contaminated sediments GDT analysis versus actual full scale project results." *Proceedings Geofrontiers 2011*, Dallas, USA, March, ASCE, pp. 2131-2140, 2011.

TENCATE. *Geotube. Environmental dredging and remediation. TenCate Geotube case studies*. Pendergrass, Georgia, EUA, 2013.

TENCATE. *GDT test (Geotube Dewatering Technology): Uma demonstração da tecnologia Geotube para desaguamento de lodo*. Commerce, Georgia, EUA, 2007.

TENCATE. *MDS (Mobile Dewatering System) Installation Guide: Manual de Instalação do sistema móvel de desidratação Geotube*. Commerce, Georgia, EUA, 2007.

TENCATE. *RDT (Rapid Dewatering Test) e Cone test: Um modo rápido e simples de medir a eficiência de desaguamento*. Commerce Georgia, EUA, 2010.

TOMINAGA, E. *Análise dos procedimentos para avaliação de desempenho de sistemas fechados com geotextil para desaguamento*. Dissertação de MSc em Engenharia de Infra-Estrutura Aeroportuária, ITA, São José dos Campos, SP, 2010.

TORRE, M. AND TIMPSON, C. "Development and evolution of key industry dewatering tests (HBT, Cone, RDT, GDT) and their accuracy in predicting full scale results." *Proceedings Geofrontiers 2011*, Dallas, USA, March, ASCE, pp. 2194-2202, 2011

TORRES, R. J. *Uma análise preliminar dos processos de dragagem do porto de Rio Grande, RS*. Dissertação de MSc em Engenharia Oceânica, FURGS, Porto Alegre, RS, 2000.

TORRES, R. J. et al. "Effects of dredging operations on sediment quality: contaminant mobilization in dredged sediments from the Port of Santos, SP, Brazil". *Journal of Soils and Sediments*, v. 9, n. 5, p. 420–432, 28 Jul. 2009.

USACE - United States Army Corps Of Engineers. *Evaluating Environmental Effects of Dredged Material Management Alternatives: A Technical Framework*. EPA842-B-92-008. Washington D.C, USA, 2004.

USDA - United States Department Of Agriculture. *Soil Survey Manual*. Agriculture Handbook n° 18, Washington D.C, USA, 2007.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. *Methods for Collection, Storage and Manipulation of Sediment for chemical and toxicological analyses: Technical Manual*. EPA 823-B-01-002. Washington D.C, EUA, 2004.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. *Assessment and Remediation of Contaminated Sediments (ARCS) Program* - EPA 905-B94-003. Chicago, Illinois, USA, 1994.

VERÓL, A. P. et al. "Procedimentos analíticos e resultados no monitoramento do tratamento de esgotos". In: *23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, n. 1, p. 1–6, Sep. 2005.

VERTEMATTI, J. C. *Manual Brasileiro de Geossintéticos*. 2ª edição, CTG ABINT, 2015.

VIDAL, D.; URASHIMA, D. C. "Dimensionamento de Filtros e drenos em geossintéticos". In: *Geossintéticos 99*. Rio de Janeiro, RJ, 1999

VLASBLOM, W. *Lectures notes on dredging equipment and technology*. Central Dredging Association, 2003.

VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 3 edição. v.1, Belo Horizonte, SEGRAC, MG, 2005.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; Harriott, P. *Unit Operations of chemical Engineering*. fifth edition, McGraw-Hill, 1993.

WURPTS, R.; TORN, P. "15 years experience with fluid mud: Definition of the nautical bottom with rheological parameters". *Terra et Aqua*, n. 99, p. 22–32, 2005.

YEE, T. W. "Geotextile tube applications for construction of the longest sea-crossing bridge in vietnam". *Terra et aqua*, v. March, p. 5–16, 2016.

YEE, T.W.; DING, L.; LIM, L.K.; WANG, Z.Y. "Geotextile containment solutions for disposal of contaminated sediments in China". *Proceedings Thirty First Western Dredging Association Technical Conference*. Nashville, USA, June, pp. 251-270, 2011.

YEE, T.W.; LAWSON, C.R. "Modelling the geotextile tube dewatering process." *Geosynthetics International*, Vol. 19, No. 5, Thomas Telford Ltd, pp. 339-353, 2012.

YEE, T.W.; LAWSON, C.R.; WANG, Z.Y.; DING, L.; LIU, Y. "Geotextile tube dewatering of contaminated sediments, Tianjin EcoCity, China". *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 31, Elsevier, pp. 39-50, 2012.

ANEXOS

ANEXO 1 – Tributários e Vazões de Contribuição.

ANEXO 2 – Bacia Hidrográfica de Jacarepaguá e regiões administrativas.

ANEXO 3 – Esquema do esgotamento Sanitário da Barra da Tijuca, Recreio dos Bandeirantes e Jacarepaguá.

ANEXO 4 – Análises de pontos de monitoramento de sedimentos do complexo Lagunar de Jacarepagua.

ANEXO 5 – Estudos acadêmicos/ científicos com caracterização de sedimento de Lagoas do complexo Lagunar de Jacarepaguá.

ANEXO 6 – Relações e Equações do viscosímetro Fann35 .

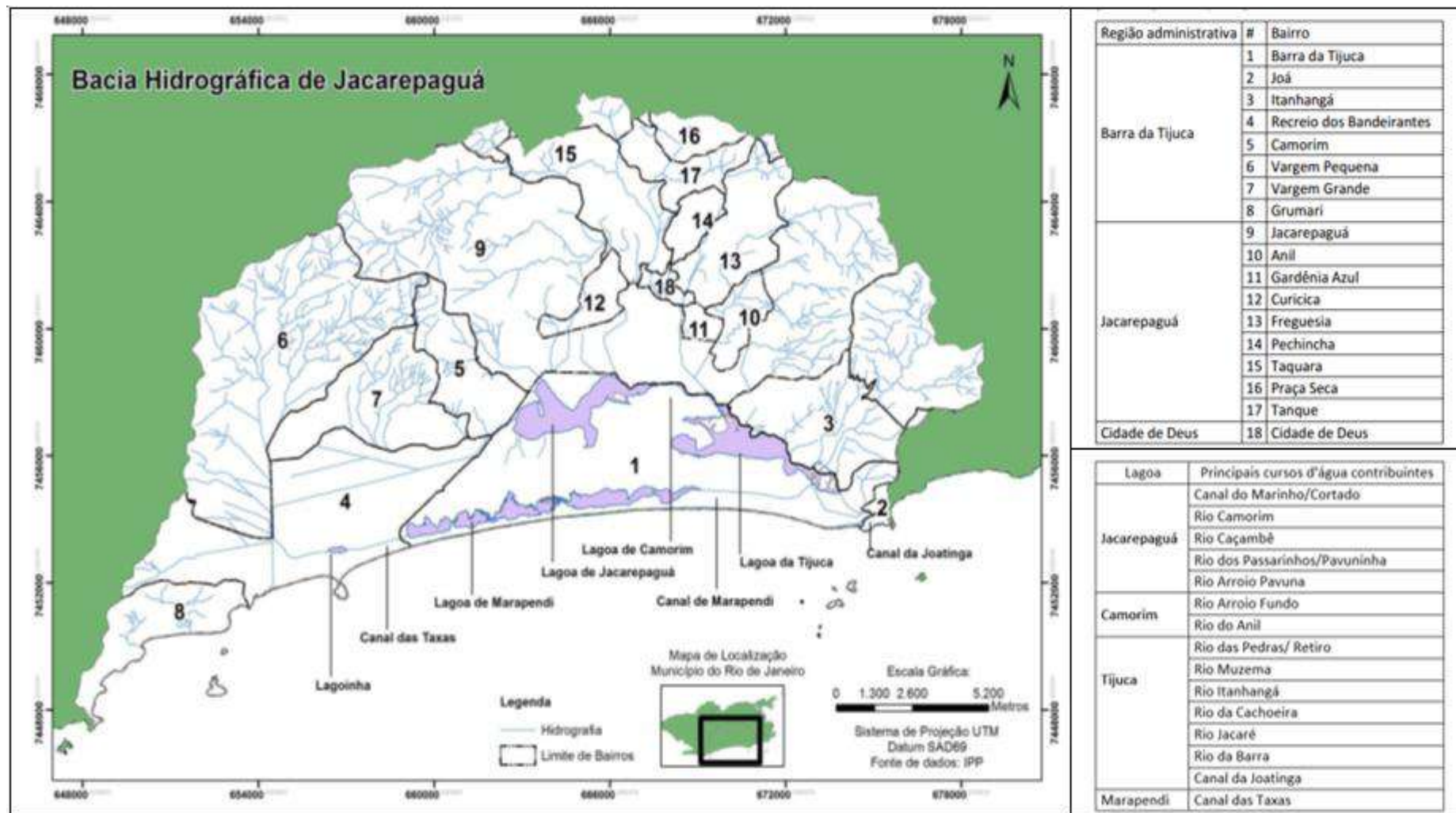
ANEXO 1 – Tributários e vazões de contribuição

Neste anexo apresenta-se as 13 regiões hidrográficas contribuintes do CLJ, suas áreas, seus principais rios tributários e respectivas vazões (elaboração própria a partir de Fernandes, 1991; Moraes, 2007; Jara, 2014 e Santos, 2014) e estudos ambientais

Lagoa /mar	Região hidrográfica contribuinte	Área (Km ²)	Principais tributários	Medeiros (1982) apud Fernandes (1991)	Marques (1990) apud Jara (2014)	Sondotécnica (1998)	SERLA - Moraes (2007)	Masterplan (2013)		Masterplan (2015)	
				Vazão (m ³ /s)	Vazão (m ³ /s)	Vazão (m ³ /s)	Vazão (m ³ /s)	Vazão seco (m ³ /s)	Vazão Chuva (m ³ /s)	Vazão seco (m ³ /s)	Vazão Chuva (m ³ /s)
Jacarepaguá	Sub bacia da Zona dos canais	72,07	Canal do Cortado e Portelo	-	-	-	-	0,3227	0,5679	2,350	1,480
	Sub bacia do rio Camorim	11,76	Rio Camorim	0,08	1,544	1,095	0,188	-	-	0,229	0,210
	Sub bacia do rio dos passarinhos	8,49	Canal Pavuninha	0,11	1,161	0,572	0,175	-	-	0,412	0,413
			Canal drenagem arena olímpica	-	-	-	-	-	-	0,075	-
	Sub bacia do rio Guerêngue	21,90	Rio arroio Pavuna	0,43	1,944	1,164	0,551	-	-	0,755	1,031
			Canal drenagem Alphaville Barra	-	-	-	-	-	-	0,177	-
	Soma dos tributários			0,62	4,649	2,831	0,914	0,3227	0,5679	3,998	3,134
				Média = 29,1% das águas fluviais tributárias do CLJ							
	Sub bacia do rio Grande	56,65	Rio arroio fundo	0,42	7,497	4,070	4,200	0,768	1,3530	7,630	3,529

Camorim	Sub bacia do rio Anil	24,82	Rio anil	0,14	2,765	1,506	0,784	0,2181	0,3839		
	Soma dos tributários			0,56	10,262	5,576	4,984	0,9868	1,7369	7,630	3,529
				Média = 58,2% das águas fluviais tributárias do CLJ							
Tijuca	Sub bacia do rio das pedras	10,48	Rio das pedras	-	0,440	-	0,183	-	-	0,603	0,367
	Micro bacia do rio Muzema	1,66	Rio Itanhangá	0,12	-	-	0,110	0,0394	0,0693	0,091	0,062
	Sub bacia do rio da cachoeira	22,71	Rio da cachoeira	0,52	0,594	0,410	0,436		-	0,831	0,980
	Soma dos tributários			0,64	1,034	0,410	0,729	0,0394	0,0693	1,525	1,409
				Média = 12,7% das águas fluviais tributárias do CLJ							
Mar	Micro bacia da Joatinga	0,22	Sem curso d'água expressivo	-	-	-	-	-	-	-	
	Micro Bacia do rio da Barra	2,29	Rio da barra	-	-	-	-	-	-	-	
	Micro bacia da prainha	1,32	Sem curso d'água expressivo	-	-	-	-	-	-	-	
	Sub bacia de Grumari	8,09	Rio das almas	-	-	-	-	-	-	-	

ANEXO 2 – Bacia Hidrográfica de Jacarepaguá e regiões administrativas (adaptado de Amorim, 2015)



ANEXO 4 – Análises dos pontos do monitoramento de sedimentos do complexo Lagunar de Jacarepaguá.

A caracterização dos sedimentos das lagoas do complexo lagunar de Jacarepaguá tem sido efetuada por trabalhos, agrupados em 3 categorias:

- Rede de monitoramento promovida por órgão público

A rede de monitoramento promovida pelo Instituto Estadual de Meio Ambiente (INEA) contempla 08 (oito) estações distribuídas nas quatro lagoas do CLJ, conforme se observa na Figura 01.

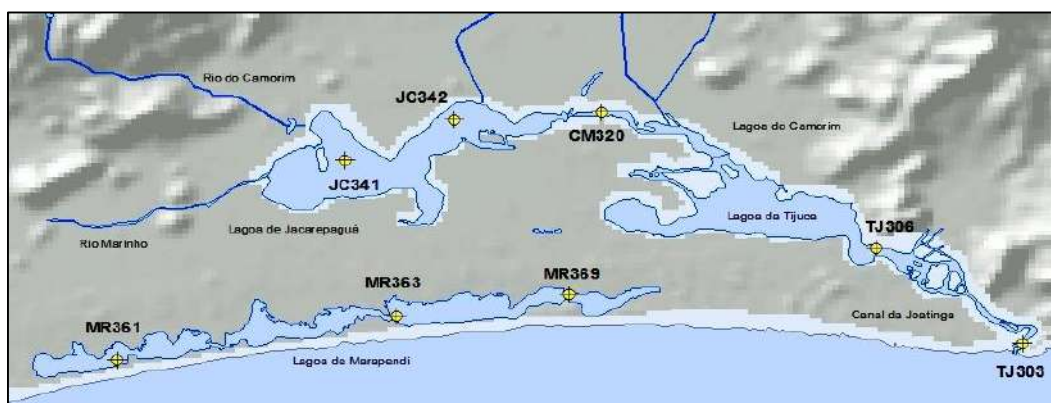


Figura 01 - Localização das estações de monitoramento de água e sedimento no CLJ realizada pelo INEA (INEA,2015)

A secretaria municipal de meio ambiente do Rio de Janeiro também já possui uma rede de monitoramento na região do CLJ com 20 (vinte) estações de coleta, cuja distribuição pode ser observada na figura 2.



Figura 02 - Localização das estações de monitoramento de água e sedimento no CLJ realizada pela secretaria municipal de Meio Ambiente do Rio de Janeiro (SMAC, 1998)

- Relatórios técnicos

Esses relatórios de caracterização do sedimento das lagoas são aqueles realizados como diagnóstico com fins de licenciamento ambiental da atividade de dragagem na região. Com relação ao sedimento de superfície do CLJ verifica-se que no período de 2011 a 2015 (5 anos) um total de 149 amostras foram coletadas para obtenção de dados relativos a granulometria, metais, nutrientes e outros parâmetros característicos recomendados pela resolução nº 454/12 do CONAMA (Tabela 01).

Estudo (ano) Empresa executora (ano) Data de coleta	Pontos de coleta							Amostras		Parâmetros analisados
	L. Jacarepaguá	L. Camorim	L. Tijuca	L. Marapendi	Canal Joatinga	Molhe	Total de Pontos	Superfície (< 1 m)	Fundo (1 a 2 m)	
Projeto Básico (2011) Projconsult (2011) (19/04 e 05/05/11)	15	5	19	17	6	-	62	62	35	- análise granulométrica - 36 parâmetros químicos, tais como: metais pesados e arsênio (8), (método 3050) Pesticidas organoclorados (11), PCB (1), HAP (13), Carbono Orgânico Total, Nitrogênio Kjeldahl Total, Fósforo Total. - Óxidos de ferro, alumínio e manganês e CTC (apenas amostras do RAS)
RAS (2013) Masterplan (2013) (Nov/2012)	1	-	2	1	-	-	4	4	-	
PBA (2014) Masterplan (2014) (15 a 18 e 22 a 27/9; 7 e 8/10/2014)	41	19	73	28	27	-	188	67	55	
EIA/RIMA (2015) Masterplan (2015) (24 e 31/6/2015) – região das cavas	11	-	2	-	-	3	16	16	13	

A localização dos pontos de coleta do Projeto Básico de Recuperação de 2011 e do Plano Básico Ambiental (PBA) de 2014 específicos para a lagoa da Tijuca pode ser observada nos mapas constantes nas Figuras 03 e 04, respectivamente.

- Estudos de caráter acadêmicos e científicos

Esses estudos foram desenvolvidos por instituições de ensino e pesquisa, como a UFF, UERJ, UFRJ e PUC-RIO, cujos trabalhos acadêmicos contribuíram com a coleta de cerca de 120 amostras de sedimento superficial das lagoas, com maior quantidade na Lagoa de Jacarepaguá (65). Os principais autores (Fernandes, 1991; Borma, 1998; Lerner, 2000; Castíglia, 2006; Cypriano, 2009; Benedetti, 2011) e respectivos trabalhos são sintetizados no ANEXO 5.



Figura 03 - Localização dos pontos de coleta na lagoa da Tijuca em 2011 (PROJCONSULT, 2011)



Figura 04 - Localização dos pontos de coleta, por unidade de caracterização de dragagem, na Lagoa da Tijuca em 2014 (MASTERPLAN, 2014)

O Banco de dados formado a partir dos valores de elementos traço dos sedimentos de superfície pode-se constatar que a lagoa de Camorim é a que apresenta a maior

quantidade de dados acima do nível 1 da resolução nº 454/12 do CONAMA, com 22% das amostras superando o padrão estabelecido, seguida pela lagoa da Tijuca com 12%. As lagoas de Jacarepaguá e Marapendi superaram o nível 1 em 7% das amostras.

A sequência decrescente dos metais que apresentam valores acima do nível 1 são: Cu (39,4%) > Zn (22,7%) > Pb (8,2%) > Ni (7,15) > Hg(4,4%) > Cd (4,3%). Não houveram valores superiores ao nível 1 para os parâmetros As e Cr. A Figura 05 ilustra a concentração dos dois primeiros elementos (Cobre e Zinco) por amostras das lagoas.

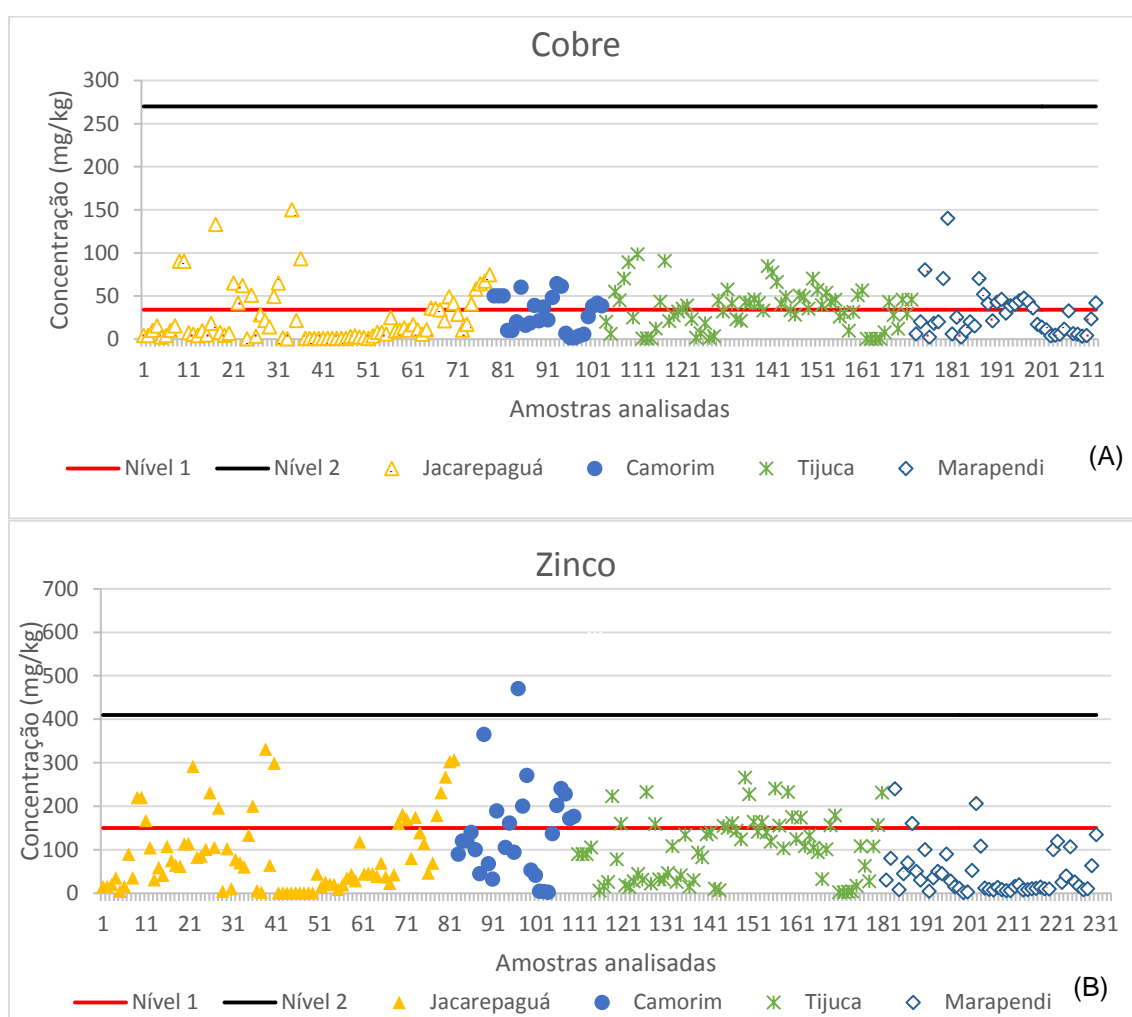


Figura 05 – Concentração de elementos traço no sedimento superficial das lagoas do CLJ: A) Cobre; B) Zinco

Os pontos de maior superação desses elementos na lagoa da Tijuca foram aqueles pertencentes a unidades de caracterização de dragagem 06, 07, 13 e 16 (Figura 04).

ANEXO 5 – Estudos acadêmicos/ científicos com caracterização de sedimento de Lagoas do complexo Lagunar de Jacarepaguá

Autor	Instituição ano	Pontos de coleta	Amostras	Principais Parâmetros analisados nos sedimentos
FERNANDES, Horst R. S. M.	UFF 1991	- 11 pto Jacarepaguá, - 07 pto Camorim, - 38 pto rios tributários	- 18 amostras das lagoas (em agosto) - 64 amostras dos rios (Jan/Fev e Jun/Jul) Coleta com amostrador tipo draga e testemunhador de tubo de acrílico com 2,0 comprimento e 6,0 cm de diâmetro interno	metais (Al, Fe, Mn, Ni, Cr, Cu, Zn, Cd, Pb, Ca, Mg, K e Na) - Fração móvel (digestão com HCl 0,5M) (18 amostras das lagoas e 63 amostras dos rios) - Extração total (digestão com HNO ₃ /HClO ₄ /HF em 15:10:5 ml). (18 amostras das lagoas e 20 amostras em rios) - Extração sequencial (método Tessier et al 1979) (3 amostras das lagoas e 3 amostras de rios)
Abordagem geoquímica – poluição por metais				
BORMA, Laura de Simone	UFRJ 1998	- 01 pto Jacarepaguá - 02 pto Camorim	- 03 amostras Coleta de 60 kg com trado helicoidal (30x15cm).	Densidade real dos grãos (norma DNER-ME 093/94), Teor de umidade natural (w) (estufa 105°C peso constante), Teor de Matéria Orgânica (Método embrapa), Limites Atterberg (LL, LP, IP e LC) (LL - NBR 6.459 e LP - NBR 7.180) Métais (Cu,Pb,Zn,Fe,Mn): - Extração total (digestão com HNO ₃ /HClO ₄ /HF em 15:10:5 ml) trip. - Extração sequencial (método Tessier et al 1979) Oxidos e Hidróxidos(FRX) / Análise Mineralógica (DRX) CTC (método Embrapa)
Acidificação e liberação de metais em sedimentos				
LERNER Henrique M.	UFRJ 2000	Lagoa da Tijuca (estação não indicada)	- 01 amostra composta Coleta de 60 kg com trado helicoidal	Granulometria (NBR 7.181/84) / Densidade real dos grãos (NBR 6.458) Limites de Atterberg (LL- NBR 6.459 e LP - NBR 7.180) Teor de M-O (método Embrapa) pH (método Embrapa)
Tratamento biológico do lodo				

Continuação.....				
Autor	Instituição ano	Pontos de coleta	Amostras	Principais Parâmetros analisados nos sedimentos
CASTÍGLIA, Maria Clara C. Paranhos	UFRJ 2006	- 04 ptos Tijuca	- 01 amostra composta (novembro/2005) Coleta de 100 kg com trado helicoidal	Granulometria (NBR 7.181/84) / Densidade real dos grãos (NBR 6458) Limites de Atterberg (LL - NBR 6.459 e LP - NBR 7.180) Teor de M-O (método Embrapa) pH (método Embrapa) Nutrientes (P e N) – (método Embrapa) Metais (Cd,Cr,Cu,Fe,Mn,Ni,Pb, Zn) – (digestão com HNO ₃ +3 HCl) CTC (método Embrapa)
Disposição subaquática de rejeitos de drenagem				
CYPRIANO, Eduardo F.	UERJ 2009	- 19 ptos Jacarepaguá, - 04 ptos Camorim, - 15 ptos Tijuca, - 24 ptos Marapendi	- 62 amostras (julho/ 2006 a Outubro/2007) Coleta com amostrador tipo draga (Ekman)	Granulometria – sedimentógrafo CILAS #40 Teor de M-O (método térmico – 450 °C em 24h) pH e Eh (pHmetros Ingold 206 e potenciômetro portátil) Mercúrio (digestão com HNO ₃ :HCl:H ₂ O - 1:3:4) água régia 50 %
BENEDETTI, Paula Elias	PUC-RIO 2011	Lagoa de Jacarepaguá: - 21 caract. geotécnica - 13 caract. química	- 21 amostras para caracterização geotécnica - 13 amostras para caracterização química (abril/2011) Coleta com amostrador tipo draga (Van Veen)	Granulometria (NBR 7.181/84) / Densidade real dos grãos (NBR 6458) Limites de Atterberg (LL - NBR 6.459 e LP - NBR 7.180) Teor de M-O (NBR 13.600/86 - método térmico – 440 °C - duplicata) Umidade higroscópia (NBR 6.457/86 - duplicata) Metais (Ba,Cd,Pb,Cu,Cr,Mn,Hg,Ni,Zn,Fe) – 13 pontos HAPs(16) – 4 pontos
Caracterização geoambiental sedimentos				

ANEXO 6 - Relação de equações estabelecidas para os testes com lama no viscosímetro Fann35 (SHIROMA, 2012)

$$\tau = 0,51\theta \quad \mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{0,51 \cdot \theta}{1,703 \cdot N} \quad \tau_L = \frac{N_2\theta_1 - N_1\theta_2}{N_2 - N_1} \quad K = \frac{1,067\theta}{(1,073N)^n}$$

$$\dot{\gamma} = 1,703 N \quad \mu_p = 300 \frac{\theta_2 - \theta_1}{N_2 - N_1} \quad n = \frac{(\log\theta_2 - \log\theta_1)}{\log N_2 - \log N_1}$$

Onde:

ângulo de deflexão (θ)

velocidade de rotação do cilindro (N) de 600, 300, 200, 100, 6 e 3 rpm.

tensão de cisalhamento (τ)

taxa de deformação ($\dot{\gamma}$)

viscosidade aparente (μ_a),

viscosidade plástica (μ_p),

limite de escoamento (τ_L),

índice de fluxo (n)

índice de consistência (k)