

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA.
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS AMBIENTAIS

LUIZ AUGUSTO ARAUJO DO VAL

AMOSTRAGEM DE SEDIMENTO AQUÁTICO EM SUSPENSÃO
POR FRACIONAMENTO E FLUXO CONTÍNUO

CAMPO GRANDE
2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS AMBIENTAIS

LUIZ AUGUSTO ARAUJO DO VAL

**AMOSTRAGEM DE SEDIMENTO AQUÁTICO EM
SUSPENSÃO POR FRACIONAMENTO E FLUXO CONTÍNUO**

Tese apresentada para obtenção do grau de Doutor no Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, na área de concentração em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos.

ORIENTADOR:

Professor Dr. Carlos Nobuyoshi Ide

CO-ORIENTADORA:

Professora Dr^a. Maria Lúcia Ribeiro

Aprovada em: 30/08/2013

Banca Examinadora:

Prof.: Dr. Carlos Nobuyoshi Ide
UFMS

Prof. Dr. Luiz Fernando de Abreu Cybis
UFRGS

Prof. Dr. Luiz Antônio de Cápua
UFMS

Prof. Dr. Jorge Luiz Steffen
UFMS

Prof. Dr. Amaury de Souza
UFMS

Campo Grande, MS
2013

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Maria Thereza e Luiz Augusto
que ajudaram na construção do meu passado.
À minha esposa Ilka por estar sempre presente.
Aos meus filhos Humberto e André nos quais deposito o meu futuro.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Dr. Carlos Nobuyoshi Ide, pela orientação, apoio e incentivo.

À minha co-orientadora, Professora Dra. Maria Lúcia Ribeiro, pela co-orientação e ajuda pela abertura das portas do LAQUA.

Ao amigo Fernando por viabilizar a construção dos protótipos, pela força e companheirismo, em nome de quem eu agradeço a todos os amigos que estiveram ao meu lado e me ajudaram.

Aos funcionários do LAQUA pela acolhida e colaboração.

À UFMS pelo afastamento concedido.

À FUNDECT pela bolsa de estudos recebida.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	ii
AGRADECIMENTOS.....	iii
SUMÁRIO.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	ix
LISTA DE SÍMBOLOS.....	x
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. HIPÓTESES E OBJETIVOS.....	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
3.1. Emprego de centrífugas de fluxo contínuo (CFC) para análise de MPS.....	6
3.2. Princípio de funcionamento das centrífugas.....	9
3.3. Principais tipos de centrífuga de fluxo contínuo.....	12
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	19
4.1. Parâmetros para definição da centrífuga.....	19
4.2. Planejamento experimental.....	22
4.3. Material utilizado na realização dos experimentos.....	25
4.4. Medida dos volumes.....	26
4.5. Medida das massas.....	27
4.6. Eficiência pela medida das massas.....	28
4.7. Eficiência pela medida da turbidez.....	30
4.8. Avaliação da eficiência energética do sistema.....	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
5.1. Centrífuga de tubo helicoidal.....	32
5.2. Centrífuga de tubos axiais.....	34
5.3. Caracterização do material utilizado.....	40
5.4. Medida de massa.....	42
5.5. Medida de turbidez.....	43
5.6. Classificação do material em suspensão.....	47
5.7. Resultados obtidos em teste de campo.....	48

5.8. Custos e eficiência energética	51
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	54
6.1. Conclusões	54
6.2. Recomendações	55
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
ANEXOS	58
ANEXO A - Resultados dos experimentos medidos através das massas.....	59
ANEXO B - Resultados dos experimentos medidos através da turbidez.....	60
ANEXO C - Turbidez de saída ajustada para os valores adotados de vazão e turbidez de entrada.	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Esquema de um hidrociclone.....	13
Figura 3.2 - Princípios de separação e filtração centrífuga: (a) Sedimentação em um bojo rotacional imperfurado; (b) Filtração em um cesto rotacional perfurado.....	13
Figura 3.3 - Centrífuga de bojo tubular.....	14
Figura 3.4 - Centrífuga de bojo compartimentado.....	15
Figura 3.5 - Centrífuga de bojo imperfurado.....	16
Figura 3.6 - Centrífuga de disco.	17
Figura 3.7 - Parte principal de uma centrífuga decantadora.....	18
Figura 3.8 - Decantrador de bojo telado.....	18
Figura 4.1 - Princípio de funcionamento do rotor de tubo.....	20
Figura 4.2 - Rotor de tubo helicoidal.	21
Figura 4.3 - Representação espacial do planejamento fatorial fracionado do tipo cubo de face centrada.....	24
Figura 4.4 - Fluxograma do experimento para medida da massa.....	28
Figura 4.5 - Fluxograma do experimento para avaliação pela turbidez.....	30
Figura 5.1 - Protótipo I - centrífuga de tubo helicoidal.	32
Figura 5.2 - Material amostrado nos 7 recolhedores.....	33
Figura 5.3 - Rotor de tubos axiais.....	34
Figura 5.4 - Rotor com sentido de caminhamento único e força centrífuga crescente.....	35
Figura 5.5 - Rotor com sentido de caminhamento alternado e força centrífuga crescente.	35
Figura 5.6 - Rotor com sentido de caminhamento único e força centrífuga alternada.	36

Figura 5.7 - Rotor de tubos axiais - vista em planta.	37
Figura 5.8 - Protótipo-II.....	38
Figura 5.9 - Disposição dos furos na tampa extratora.....	38
Figura 5.10 - Tampa extratora posicionada no suporte giratório dos frascos.	39
Figura 5.11 - Disposição dos 26 frascos.	39
Figura 5.12 - Suporte giratório dos frascos montado sobre o cavalete.....	40
Figura 5.13 - Aspecto visual dos quatro tipos de solo.	40
Figura 5.14 - Curva granulométrica do material da entrada.....	41
Figura 5.15 - Efeitos principais da rotação, vazão e turbidez de entrada sobre a eficiência.	45
Figura 5.16 - Interação entre rotação, vazão e turbidez de entrada sobre a eficiência.	47
Figura 5.17 - Curvas granulométricas para os 4 estágios.....	48
Figura 5.18 - Curvas granulométricas para os 4 estágios - Rio Miranda.....	49
Figura 5.19 - Distribuição percentual da massa retida por diâmetro e por estágio.	51
Figura 5.20 - Relação entre vazão e pressão na entrada da centrífuga em função da rotação.....	52
Figura 5.21 - Consumo de energia por grama de material em suspensão recuperado em função da concentração de sólidos em suspensão na entrada da centrífuga.....	53
Figura 5.22 - Tempo gasto e volume amostrado para recuperar 1g de material em suspensão em função da concentração de sólidos em suspensão na entrada da centrífuga.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Variáveis interferentes no processo experimental.....	22
Tabela 4.2 - Configuração do planejamento fatorial fracionado do tipo cubo de face centrada.....	24
Tabela 5.1 - Características do rotor utilizado no protótipo-II.....	37
Tabela 5.2 - Densidade dos solos que compõem a amostra.....	41
Tabela 5.3 - Valores médios para os níveis baixo, médio e alto da vazão e turbidez de entrada.....	44
Tabela 5.4 - Percentual de massa retida por estágio e por diâmetro.....	50

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
CFC	Centrífuga de fluxo contínuo
GEF	Global Environment Facility
MPS	Material Particulado em Suspensão
OEA	Organização dos Estados Americanos
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
USEPA	United States Environmental Protection Agency
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Definição	Unidade
a_{cf}	Aceleração centrífuga	cm.s^{-2}
a_{co}	Aceleração de Coriolis	cm.s^{-2}
a_{cp}	Aceleração centrípeta	cm.s^{-2}
C_i	Concentração inicial na entrada	mg.L^{-1}
L	Comprimento	cm
ρ	Densidade	g.cm^{-3}
ρ_L	Densidade do líquido	g.cm^{-3}
ρ_s	Densidade do sólido	g.cm^{-3}
d	Diâmetro da partícula	cm
D	Diâmetro do tubo	cm
Ef_e	Eficiência efetiva da centrífuga	Adimensional
Ef_T	Eficiência da centrífuga na redução da turbidez	Adimensional
δ	Espessura da camada de Ekman	cm
Ex	Extensão do tubo no interior da centrífuga	cm
G	Gravidade centrífuga	cm.s^{-2}
g	Gravidade terrestre	cm.s^{-2}
M_{AS}	Massa de Sólidos em Suspensão retida na alimentação	mg
M_{CSE}	Massa de Sólidos em Suspensão efetiva na centrífuga	mg
M_{CSN}	Massa de Sólidos em Suspensão não aproveitada na centrífuga	mg
M_{ES}	Massa de sólidos em suspensão na entrada	mg
M_{SS}	Massa de Sólidos em Suspensão na Saída	mg
Ek	Número de Ekman	Adimensional
Re	Número de Reynolds	Adimensional
Ro	Número de Rossby	Adimensional
r	Raio de centrifugação	cm
t_s	Tempo de sedimentação	s
TEa	Turbidez adotada na entrada	NTU
TSc	Turbidez calculada na saída	NTU

Símbolo	Definição	Unidade
TE	Turbidez na entrada da centrífuga	NTU
TS	Turbidez na saída da centrífuga	NTU
Qa	Vazão adotada	L.min ⁻¹
Q	Vazão líquida	L.s ⁻¹
u	Velocidade	cm.s ⁻¹
Ω	Velocidade angular	r.min ⁻¹
u_e	Velocidade de escoamento do fluido	cm.s ⁻¹
u_s	Velocidade de sedimentação	cm.s ⁻¹
u_{Θ}	Velocidade tangencial	cm.s ⁻¹
ν	Viscosidade cinemática (μ/ρ)	cm ² .s ⁻¹
μ	Viscosidade líquida	g.cm ⁻¹ .s ⁻¹
V _E	Volume adicionado na entrada	L
V _S	Volume na saída	L
V _A	Volume retido na alimentação	L
V _C	Volume retido na centrífuga	L

RESUMO

VAL, L.A.A. (2013). *Amostragem de Sedimento Aquático em Suspensão por Fracionamento e Fluxo Contínuo*. Campo Grande, 2013. 78 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil.

Os métodos tradicionais de amostragem de água nem sempre produzem quantidades suficientes de material particulado em suspensão para a realização de análises físicas, químicas e biológicas. Para atender a esta demanda foi desenvolvido um novo tipo de rotor de centrífuga de baixo custo com capacidade de classificar por faixas granulométricas e separar o material particulado em suspensão com diâmetros acima de 1 micrômetro utilizando força centrífuga inferior a 300 vezes a força da gravidade. O protótipo construído com R\$5.500,00 apresentou um gasto energético de 0,5kWh para recuperar um grama de matéria seca em 30L de amostra com 50mg.L⁻¹ de material particulado em suspensão em uma hora. Em um teste de campo foi recuperado 7.380mg de material particulado em suspensão em 150L de água com eficiência efetiva da centrífuga na retenção de massa igual a 71,3%. Em 15 testes realizados em laboratório medindo-se as massas encontrou-se eficiência efetiva média de 68,4% com 95% de confiança da média se encontrar no intervalo de 64,5% a 72,4%. Para os 81 testes realizados em laboratório medindo-se a turbidez na entrada e na saída da centrífuga a eficiência média foi de 79,6% com 95% de confiança da média se encontrar no intervalo de 75,7% a 83,5%. O rotor de tubo helicoidal apresentou eficiência de 80% na retenção de sólidos em suspensão e apresentou características operacionais que possibilitam o seu uso como sistema de pré-tratamento de água. O rotor de tubos axiais atendeu como amostrador de material particulado em suspensão, separando este material por faixas granulométricas.

Palavras-Chave: Centrífuga, Material Particulado em Suspensão, Separação.

ABSTRACT

VAL, L.A.A. (2013). *Suspended Sediment in Water Sampling by Fractionation and Continuous Flow*. Campo Grande, 2013. 90 p. Thesis (Ph.D.) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil.

The traditional methods of water sampling not always produce sufficient quantity of suspended particulate matter to perform physical, chemical and biological analysis. To supply that demand we have developed a new type of low cost centrifuge rotor with ability to sort by particle sizes and separate the suspended particulate matter with diameters greater than 1 micrometer using centrifugal force less than 300 times the force of gravity. The prototype was built with R\$5,500.00 and had an energy expenditure of 0.5kWh to recover one gram of dry matter in 30L of sample with 50mg.L⁻¹ of suspended particulate matter in one hour. In a field test was recovered 7,380mg of suspended particulate matter in 150L of water with efficiency in retaining the mass equal to 71.3%. In 15 laboratory tests by measuring the masses was found average efficiency of 68.4% with 95% confidence of the average is in the range of 64.5% to 72.4%. For 81 tests performed in the laboratory by measuring the turbidity at the inlet and outlet the centrifuge average efficiency was 79.6% with 95% confidence of the average is in the range of 75.7% to 83.5%. The rotor of helical tube showed 80% efficiency in the retention of suspended solids and had operating characteristics that enable its use as the pretreatment system of water. The rotor of axial tubes attended as sampler of suspended particulate matter, separating this material by particle sizes.

Key-words: Centrifuge, Suspended Particulate Matter, Separation.

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento da qualidade da água é obtido através de informações quantitativas e qualitativas das características físicas, químicas e biológicas da água, através de amostragem estatística. O tipo de informação procurada depende dos objetivos do monitoramento e variam desde a detecção de violações dos padrões de qualidade da água, até a determinação de suas características físicas e suas tendências temporais.

Três tipos principais de partículas sólidas (matéria particulada) podem ser diferenciados em rios e lagos, embora esta classificação não seja absoluta. Um tipo pode ser convertido em outro, pelas mudanças na velocidade da água. Esses tipos são (UNECE, 2002):

- Sedimentos suspensos - partículas mantidas em suspensão pela turbulência da água sobre o leito do rio ou fundo de lago. Em rios, a quantidade total e o tamanho da partícula variam com o fluxo e épocas do ano. Em lagos, a quantidade é normalmente pequena, menor que 10mg.L^{-1} , e consiste principalmente de detritos lacustres orgânicos e partículas de solo muito finos;

- Sedimentos de fundo - aquela parte da matéria particulada que permanece em contato quase constante com o leito do rio e é movida por rolamento, deslizamento ou saltitamento, que é mais lento que a velocidade da água;

- Material depositado - resulta de uma diminuição na energia da água. Isto conduz à deposição do material, cuja taxa depende do tamanho da partícula.

O sedimento pode ser definido em termos de tamanho de partícula e composição mineralógica, ambos inter-relacionados. As características físicas e químicas do sedimento são produtos da composição do material fonte, tamanho do material fonte, trajetos percorridos durante transporte e contaminações recebidas, e das condições físicas até o ponto de deposição.

A liberação e o transporte de poluentes, como também as interações com a água e a biota, no ambiente aquático, são devidos às características do material particulado em suspensão (MPS). O MPS é definido como a matéria particulada orgânica e inorgânica, que é

transportada em suspensão pela água. Também, frequentemente, são utilizados os termos sedimentos suspensos, sólidos suspensos totais, detritos, turbidez ou materiais erodidos, entre outros. Ocorrem naturalmente em corpos d'água. É um problema para a qualidade da água, se estiverem transportando nutrientes, metais pesados, agrotóxicos ou outras substâncias introduzidas, tornando crítica a saúde de um corpo d'água. O MPS e sedimentos de fundo, em quantidades naturais, criam valiosos micro-habitats (USEPA, 2003). Em pesquisa realizada para ANA/GEF/PNUMA/OEA, a equipe de pesquisadores coordenada por C. N. Ide verificou que os rios tributários do Pantanal apresentam quantidades excessivas de sedimentos, causando elevada turbidez, prejudicando a fauna aquática (IDE, 2003). As condições naturais podem ser perturbadas, por exemplo, pela construção de uma barragem, onde a formação do reservatório se torna um meio natural de retenção dos sedimentos devido à redução da velocidade da corrente, podendo em alguns casos ocasionar uma melhoria na qualidade da água a jusante (CARVALHO, 2008). Entretanto, pode-se mesmo dizer que os reservatórios terminarão por ficar totalmente assoreados com o tempo (BRUK, 1985 *apud* CARVALHO, 2008), surgindo aí uma necessidade de se conhecer em profundidade os fenômenos relacionados ao transporte de sedimentos visando dominar técnicas que permitam o seu monitoramento.

Os equipamentos para amostragem de uma mistura água/sedimento, para medição indireta da descarga em suspensão e cuja amostra também pode ser utilizada em análise de qualidade, podem ser classificados em 3 categorias: instantâneos, por integração e por bombeamento. A amostragem de sedimentos suspensos pode ser realizada com a utilização de amostradores ou medidores de sedimentos em suspensão, que podem ser classificados em 13 diferentes tipos. Os medidores são aqueles que permitem identificar diretamente a concentração de sedimentos e em alguns deles a sua distribuição granulométrica, são eles os medidores Fotoelétrico; Nuclear; Ultra-Sônico Ótico; Ultra-Sônico de Dispersão; Eletrônico; e a Laser. Os amostradores são aqueles equipamentos que coletam uma amostra que pode ser levada ao laboratório para análise, são eles os amostradores de Tubo Comum Vertical; Instantâneo Vertical; Horizontal de Retenção Instantânea; que usa Garrafa; de Saca; por Bombeamento; e Integrador. Por apresentar uma amostragem mais representativa, os amostradores por integração são os mais usados em todo o mundo. (CARVALHO, 2008). Entretanto, para os estudos de qualidade da água, Ide (2003) demonstrou não haver diferença significativa entre as amostragens realizadas com amostrador por integração ao longo da seção e as realizadas com amostrador pontual na vertical de maior velocidade x profundidade.

Se a quantidade de amostra for insuficiente ou pequena, para análise ambiental, serão necessários equipamentos e métodos sensíveis a baixas concentrações, principalmente aquelas encontradas a nível de concentração partes por trilhão (ppt), como os agrotóxicos, em águas naturais. Caso contrário, ficarão abaixo do nível de detecção do método ou equipamento analítico. Para obter amostras em quantidades suficientes para todas as análises ambientais é necessário o transporte de grande volume de amostra ao laboratório, o que inviabiliza o método por diversos fatores como: prazo de validade da amostra; enorme quantidade de recipientes e geladeiras.

Os métodos tradicionais nem sempre produzem quantidades suficientes de matéria particulada suspensa para as análises físicas, químicas e biológicas.

Para se coletar 50g de MPS, em águas naturais, por exemplo, contendo 25mg.L^{-1} de sólidos suspensos, é necessária a coleta de pelo menos 2000L de amostra de água. Esse volume de amostra é praticamente impossível de ser transportado ao laboratório, mantendo-se todos os cuidados de preservação, além de viaturas de maior porte para o seu transporte, sendo que em muitos casos os locais de coleta só são acessados com o uso de pequenas embarcações.

Nesta situação, o emprego de uma centrífuga de campo de fluxo contínuo com separador por faixas granulométricas, associada a uma amostragem com um sistema de bombeamento, pode apresentar elevada eficiência na coleta de sedimentos em suspensão.

2. HIPÓTESES E OBJETIVOS

Para a realização de análises físicas, químicas e biológicas, do material particulado encontrado em suspensão nas águas naturais é necessária a amostragem deste material em quantidades suficientes para atender aos protocolos estabelecidos para estas análises. Nos métodos tradicionais de amostragem de água o material particulado em suspensão é coletado na concentração em que o mesmo se apresenta no corpo d'água e desta forma os poluentes que se encontram adsorvidos neste material são transportados nesta mesma concentração, exigindo muitas vezes a amostragem de grandes quantidades de água para a realização destas análises. Tomando-se por base a necessidade de redução do volume da amostrada a ser levada ao laboratório, estabeleceu-se as seguintes hipóteses.

Hipótese 1: Considerando que o material particulado transportado em suspensão é muitas vezes encontrado em baixas concentrações é possível aumentar a sua concentração com a utilização de um processo de amostragem por centrifugação.

Hipótese 2: Considerando que os poluentes encontrados em águas naturais são adsorvidos pelas menores partículas é possível separar, por tamanho, o material particulado em suspensão durante o processo de amostragem.

Hipótese 3: Considerando que com a utilização de grandes forças centrífugas o impacto das partículas no processo de separação pode alterar a granulometria destas partículas é possível separar o material particulado em suspensão com a aplicação de pequenas forças centrífugas.

Hipótese 4: Considerando que a eficiência na separação por centrifugação depende da rotação, do diâmetro de centrifugação, do tempo de detenção da amostra e que centrífugas que trabalham com altas rotações são equipamentos caros, é possível construir uma centrífuga de baixo custo reduzindo-se a rotação e aumentando-se o diâmetro e o tempo de detenção.

Para testar as hipóteses o trabalho teve como objetivo geral desenvolver um equipamento capaz de melhorar a avaliação da qualidade ambiental do Material Particulado em Suspensão encontrado em águas naturais, nos seus aspectos físicos e químicos.

Como objetivos específicos tem-se:

- a) desenvolvimento de uma centrífuga de baixo custo capaz de aumentar a concentração do material particulado encontrado em suspensão em águas naturais, com o emprego de baixa força centrífuga e separando-os por faixas granulométricas;
- b) avaliação da eficiência da centrífuga na remoção do material particulado em suspensão;
- c) avaliação da capacidade da centrífuga na separação em faixas granulométricas do material particulado em suspensão.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Emprego de centrífugas de fluxo contínuo (CFC) para análise de MPS

A amostragem de sedimentos em suspensão por meio de bombeamento e centrífugas de fluxo contínuo (CFC) tem sido utilizada para aumentar a concentração de sedimentos com vários propósitos como, por exemplo, os estudos realizados por Ongley (1981) e Moody e Meade (1994) para determinação da curva granulométrica do sedimento em suspensão e coleta de grande volume da amostra de sedimento; os estudos realizados por Zuckerman e Tzipori (2006) para validação e demonstração da eficácia do uso de uma centrífuga portátil de fluxo contínuo como uma alternativa da etapa de concentração do método US-EPA 1623 para recuperação de baixo número de protozoa em grande volume da água de diversas fontes; a Centrífuga de Fluxo Contínuo (CFC) utilizada por Higgins *et al.* (2003) em conjunto com outras técnicas para recuperação e detecção de oocistos de *Cryptosporidium parvum* e cistos de *Giardia intestinalis*; os estudos dos efeitos da centrifugação sobre as medidas de elementos traços em águas de rios realizados por Rossé, Vignati e Dominik (2006); a utilização de três técnicas incluindo a centrifugação de fluxo contínuo, por Douglas; Beckett e Hart (1993), para o fracionamento e a concentração de material particulado em suspensão em grandes amostras de águas naturais; a comparação entre sistemas de centrifugação e filtração realizada por Horowitz (1986) para concentração de sedimentos suspensos na água para posterior análise de metais traços; o estudo feito por Rostad, Rees e Daniel, (1998) com a utilização de bombeamento associado a uma centrífuga de fluxo contínuo de alta velocidade como parte do processo para separar partículas de tamanho coloidais visando avaliar as mudanças no tamanho dessas partículas. Estes trabalhos mostram a aplicabilidade das CFCs na separação de MPS presente em águas naturais com a finalidade de estudar o meio ambiente.

A centrifugação de fluxo contínuo (CFC) é uma técnica bem estabelecida utilizada para isolar partículas em suspensão em águas naturais superficiais que pode ser usada para análise de concentração de elementos em suspensão (ONGLEY e BLATCHFORD, 1992; BARRUS *et al.*, 1989; HOROWITZ *et al.*, 1989; REES *et al.*, 1991; DOUGLAS *et al.*, 1992; MOODY e MEADE, 1994 *apud* ROSSÉ, VIGNATI e DOMINIK, 2006). Comparada com a filtração por membrana, a qual é largamente utilizada na remoção de partículas em águas

naturais, a CFC não sofre problemas como a ruptura da membrana, polarização e coagulação superficial, que pode resultar numa separação ineficaz dos sólidos (BUFFLE *et al.*, 1992 *apud* ROSSÉ, VIGNATI e DOMINIK, 2006). Além disso, a CFC separa as partículas de acordo com o tamanho e densidade, de forma semelhante ao que ocorre em sistemas naturais, enquanto a filtração é simplesmente uma separação por tamanho. Vale lembrar que a CFC permite uma amostragem de grandes quantidades de sólidos suspensos. Na prática, a disponibilidade de grandes quantidades de material abre a possibilidade de uma maior compreensão química, física, mineralógica e também toxicológica do material em suspensão (ROSSÉ, VIGNATI e DOMINIK, 2006).

Por outro lado, três principais problemas devem ser analisados acerca do uso de CFC na coleta de partículas para estudos ambientais: a eficiência de recuperação, a possibilidade de contaminação pelos componentes da CFC, e os efeitos físicos da centrifugação durante a coleta das partículas. Estes três problemas devem ser estudados com algum cuidado, e a susceptibilidade da CFC na coleta de partículas do meio ambiente para análises de elementos traços tem sido demonstrada (SANTIAGO *et al.*, 1992; REES *et al.*, 1991 *apud* ROSSÉ, VIGNATI e DOMINIK, 2006).

A possibilidade de uso do efluente da centrifugação para futuras investigações como análise de elementos e contagem de partículas é ainda uma matéria a ser discutida (ROSSÉ, VIGNATI e DOMINIK, 2006).

Horowitz *et al.* (1989) e Rees *et al.* (1991), *apud* Rossé, Vignati e Dominik (2006) não recomendam o uso de efluentes de centrífuga para análise de elementos traços por causa da ocorrência de contaminação ou mudanças na distribuição do tamanho das partículas durante o processo de centrifugação. Ainda, em um estudo de tamanhos de partículas coloidais no Rio Mississippi, Rostad, Rees e Daniel, (1998) concluíram que a centrifugação não afetou o tamanho da partícula da fração coloidal, baseado no diâmetro médio e na polidispersão medida por meio de correlação de espectroscopia de fóton.

Significantes incrementos na concentração de elementos foram detectados por Rossé, Vignati e Dominik (2006) no efluente de CFC, concordando com os resultados dos trabalhos de Rees *et al.* (1991) e Horowitz *et al.* (1989), *apud* Rossé, Vignati e Dominik (2006). Os resultados sugerem que durante as operações de campo, contaminações elementares se originaram tanto dos componentes da centrífuga como da quebra de partículas no seu interior. Diferentemente dos resultados encontrados por Rostad, Rees e Daniel, (1998), as medidas

realizadas com a utilização de um contador de partículas apresentaram um aumento no número de colóides para o efluente da centrífuga para tamanhos de classes abaixo do ponto de corte da centrífuga. A hipótese de fragmentação proposta é explicada satisfatoriamente pelo elevado aumento na concentração de elementos, observado em águas com turbidez e da comparativamente baixa mudança obtida para experimentos com baixa concentração de material particulado em suspensão (ROSSÉ, VIGNATI e DOMINIK, 2006).

Em seu estudo Rossé, Vignati e Dominik (2006) recomendam que para águas com baixa turbidez a utilização de CFC para ultrafiltração em larga escala é uma possibilidade extremamente importante o que permitiu isolar grandes quantidades de material coloidal, necessário em estudos ambientais envolvendo técnicas como Raio X fluorescente e difração, medidas por radionuclídeos ou bioensaios.

Higgins *et al.* (2003) em estudos para determinação da eficiência da CFC na separação de oocistos de *Cryptosporidium parvum* concluíram que, embora menos eficiente que os métodos baseados em cápsulas de filtração (US-EPA Method 1623), a CFC associada com separação imunomagnética é uma alternativa mais rápida e econômica para isolar oocistos de *Cryptosporidium parvum* em águas de alta turbidez contendo pequenas quantidades de oocistos. Já, Zuckerman e Tzipori (2006), utilizando uma CFC portátil adaptada, desenvolveram uma metodologia que apresentou resultados melhores que os conseguidos pelo método US-EPA 1623 para recuperação de oocistos de *Criptosporidium parvum*, indicando ainda que esta metodologia possa também ser igual ou superior à filtração para monitoramento de protozoários em esgotos e efluentes. Em estudos anteriores Zuckerman *et al.* (1999) encontraram resultados mais eficientes utilizando uma Centrífuga Portátil Diferencial de Fluxo Contínuo, comparado aos resultados obtidos ao utilizar Floculação com Carbonato de Cálcio e com a utilização de Cartucho de Filtração que apresentou os piores resultados na recuperação de *Giardia* e *Cryptosporidium* em experimentos com amostras de água esterilizada, água filtrada e água de rio.

Crossan *et al.* (2002) obtiveram bons resultados utilizando um sistema de centrifugação por fluxo de separação em estreitos canais de fracionamento (Centrífuga SPLITT) para separação de MPS para medir a distribuição de pesticidas na água de escoamento superficial em uma irrigação simulada.

Na década de 70 Edwin D. Ongley desenvolveu e patenteou um método de amostragem por bombeamento e centrifugação de fluxo contínuo e concomitantemente

desenvolveu e patenteou um aparato constituído basicamente de uma câmara de mistura onde a amostra coletada por diversas bombas dispostas em pontos diferentes de um corpo d'água era homogeneizada, passando daí para uma câmara de separação onde parte da amostra era descartada e a outra conduzida a uma centrífuga de fluxo contínuo. (ONGLEY, 1981). Em testes realizados com seu aparato, utilizando uma centrífuga Alaf-Laval MAB102 com vazão de $6\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, Ongley (1981) conseguiu uma eficiência de 85% calculada com base na concentração de sólidos na saída em relação à concentração na entrada da centrífuga.

Moody e Meade (1994) apresentaram um método para coleta de sedimentos em suspensão para rios largos com a utilização de bombeamento e separação por CFC. A eficácia do método foi avaliada comparando-se a distribuição de tamanhos de partículas coletadas por bombeamento com as coletadas pelo método de integração na vertical e separadas por decantação gravitacional. No método proposto o bombeamento foi feito a meia profundidade até 5m, sendo desta maneira subamostradas as partículas de tamanho das areias ($>63\mu\text{m}$), mas apresentando uma amostragem representativa para partículas de silte e argila ($<63\mu\text{m}$). As amostras bombeadas foram peneiradas e as partículas menores que $63\mu\text{m}$ separadas pela CFC. A concentração total de areias amostradas por bombeamento foram sempre inferiores às amostradas por integração na vertical, mas a concentração total de silte e argila amostrados por bombeamento diferiram menos que 1% daquelas amostradas por integração na vertical. Como o método apresentado por Moody e Meade (1994) dependem de quão homoganeamente estão distribuídas as partículas de silte e argila ($<63\mu\text{m}$) na vertical, este só é recomendado para utilização em rios que apresentarem esta característica.

3.2. Princípio de funcionamento das centrífugas

Para a separação de sólidos em meio líquido as centrífugas empregadas podem ser classificadas em dois tipos: a) centrífugas de sedimentação, que requerem a diferença de densidades entre as duas fases (sólido - líquido ou líquido - líquido) e b) centrífugas filtrantes para a separação sólido - líquido, onde a fase sólida é retida por um elemento filtrante que permite a livre passagem da fase líquida (PERRY, GREEN e MALONEY, 1999).

A teoria apresentada, a seguir, se refere aos princípios gerais voltados para a separação sólido - líquido, segundo Perry, Green e Maloney (1999).

Aceleração centrípeta e aceleração centrífuga. A aceleração centrípeta provoca a força necessária para manter a massa de um corpo em movimento através de uma trajetória curva. A aceleração centrípeta, dada pela relação cinemática que representa a força atuando perpendicularmente à direção do movimento e em sentido ao centro de curvatura, pode ser expressa pela equação (3.1).

$$a_{cp} = \frac{u_{\Theta}^2}{r} \quad (3.1)$$

onde u_{Θ} é a velocidade tangencial no ponto e r o raio de curvatura. Esta análise se refere ao movimento de um corpo em um quadro referencial inercial.

Para os processos que ocorrem em uma centrífuga é mais desejável que se considere o corpo em um quadro referencial não inercial como aquele de rotação na mesma velocidade angular da centrífuga. Desta forma, algumas forças adicionais e acelerações surgem, algumas inexistentes num referencial inercial, como a força centrífuga experimentada por um corpo no quadro de rotação, com direção perpendicular ao movimento e sentido oposto ao centro de curvatura, sendo expressa pela equação (3.2).

$$a_{cf} = \Omega^2 r \quad (3.2)$$

onde Ω é a velocidade angular do quadro de rotação e r o raio a partir do eixo de rotação.

Aceleração G. A aceleração G (gravidade centrífuga) que ocorre dentro da centrífuga pode ser expressa pelo número G/g, equação (3.3) ou (3.4), que corresponde ao número de vezes a aceleração da gravidade (g).

$$\frac{G}{g} = \frac{\Omega^2 r}{g}, \text{ ou} \quad (3.3)$$

$$\frac{G}{g} = 0,001118\Omega^2 r \quad (3.4)$$

onde r é o raio de centrifugação, em metros, e Ω a rotação, em rotações por minuto. A aceleração G/g pode ser tão baixa como 100 vezes a aceleração da gravidade, para pequenas velocidades em centrífugas decantadoras. Ou tão grande como 15.000 vezes a

aceleração da gravidade para altas velocidades em centrífugas com disco. Pelo fato de G ser muitas vezes maior que g , o efeito da força da gravidade é desprezado.

Aceleração de Coriolis. Quando um corpo se move com velocidade linear u em um quadro rotacional com velocidade angular Ω , ele sofre a aceleração de Coriolis e sua grandeza pode ser expressa pela equação (3.5).

$$a_{co} = 2\Omega u \quad (3.5)$$

O vetor Coriolis se localiza no mesmo plano do vetor velocidade e é perpendicular ao vetor rotação. Se o plano de rotação girar no sentido anti-horário então a aceleração de Coriolis é direcionada a 90° no sentido horário a partir do vetor velocidade. Quando um corpo se move retilineamente sobre um quadro rotacional sua trajetória é distorcida pela aceleração de Coriolis .

Efeito da viscosidade do fluido e da inércia. O efeito dinâmico da viscosidade sobre a mistura líquida rodando numa centrífuga de sedimentação é confinado em camadas de fluido muito finas, conhecidas como camadas de Ekman. Estas camadas são adjacentes à superfície de rotação e perpendiculares ao eixo de rotação. A espessura da camada de Ekman δ é expressa pela equação (3.6).

$$\delta = \sqrt{\frac{(\mu/\rho)}{\Omega}} = \sqrt{\frac{\nu}{\Omega}} \quad (3.6)$$

Onde $\nu = \mu/\rho$ é a viscosidade cinemática do líquido. Estas camadas são muito finas, não obstante são responsáveis pela transferência do momento angular entre as superfícies de rotação para o fluido durante a aceleração e desaceleração. O efeito viscoso é caracterizado pelo número adimensional de Ekman, equação (3.7).

$$Ek = \frac{\mu/\rho}{\Omega L^2} \quad (3.7)$$

Onde L é um comprimento característico. Ek mede a amplitude do efeito viscoso para aquele fluxo de massa.

O efeito da inércia do fluido se manifesta durante uma mudança abrupta na velocidade da massa fluida e é quantificado pelo número de Rossby, expresso pela equação (3.8).

$$Ro = \frac{u}{\Omega L} \quad (3.8)$$

Tipicamente, Ro é pequeno da ordem de 1 com a extremidade superior da faixa mostrando um possível efeito devido à inércia, enquanto que o número Ek é usualmente muito pequeno, 10^{-6} ou menor. Portanto, o efeito viscoso é confinado em finas camadas limite com a espessura $Ek^{1/2}L$.

Velocidade terminal da partícula em centrífugas de sedimentação.

A velocidade terminal u_s de uma esfera de raio d , em um líquido viscoso e sob a ação da força da gravidade g é determinada de acordo com a lei de Stokes. No interior de uma centrífuga a lei de Stokes é modificada pela "gravidade centrífuga" $G = \Omega^2 r$, podendo ser escrita como a equação (3.9).

$$u_s = \frac{1}{18\mu} \Omega^2 r (\rho_s - \rho_L) d^2 \quad (3.9)$$

Para obter-se uma boa separação ou alta velocidade de sedimentação, geralmente é suficiente atender a uma combinação das seguintes condições, apresentadas em ordem crescente de importância: alta velocidade de centrifugação, grandes diâmetros de partículas, grande diferença de densidade entre sólido e líquido, grande raio de centrifugação e baixa viscosidade.

3.3. Principais tipos de centrífuga de fluxo contínuo

Segundo Sutherland (2005) as centrífugas alcançam a separação por meio da força conseguida pelo aumento da aceleração da gravidade com a rotação, podendo ultrapassar muitas vezes a força da gravidade para promover a sedimentação de uma suspensão ou usando sua força para promover a filtração.

Um dispositivo simples que promove a separação utilizando a força centrífuga e que geralmente não é considerado uma centrífuga é o hidrociclone, no qual a força de separação é produzida pelo movimento induzido pela introdução tangencial da solução. No hidrociclone a

força centrífuga afasta as partículas mais pesadas para as paredes do equipamento, o que permite uma descarga constante do material retido, que sai por uma abertura na parte inferior, enquanto que a solução filtrada sai por uma abertura na parte superior (SUTHERLAND, 2005).

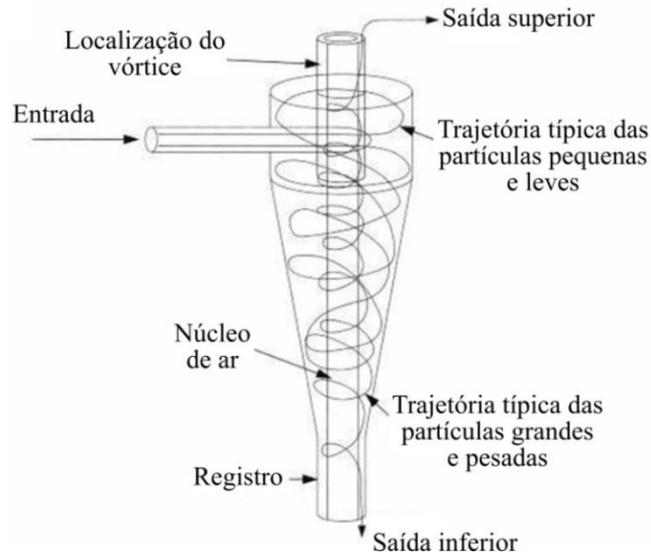


Figura 3.1 - Esquema de um hidrociclone.
Fonte: Lenntech (2013).

Perry, Green e Maloney (1999) classificam as centrífugas em dois tipos, as de sedimentação e as por filtração, conforme apresentado na figura 3.2. A figura 3.2a apresenta um desenho esquemático de uma típica centrífuga de sedimentação com um rotor de bojo imperfurado e a figura 3.2b uma típica centrífuga por filtração com um rotor de cesto perfurado.

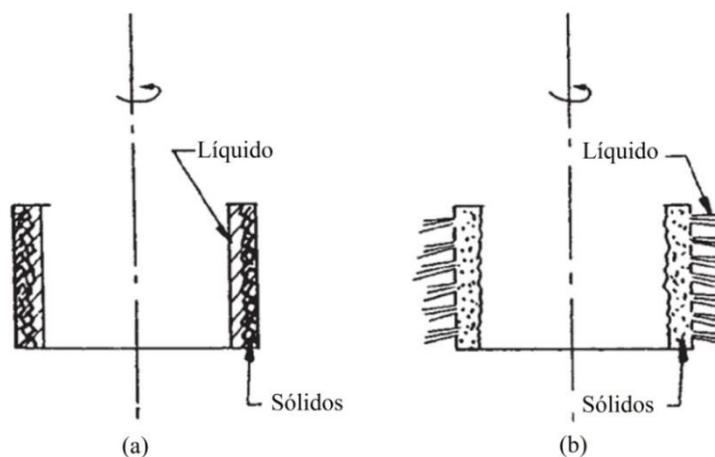


Figura 3.2 - Princípios de separação e filtração centrífuga: (a) Sedimentação em um bojo rotacional imperfurado; (b) Filtração em um cesto rotacional perfurado.
Fonte: Perry, Green e Maloney (1999).

Sutherland, (2005), apresenta cinco tipos de centrífugas utilizando o princípio de separação por sedimentação e fluxo contínuo, apresentadas em ordem crescente de complexidade de projeto, aumentando essa complexidade principalmente com o aumento da concentração de sólidos na entrada e com a capacidade de descarga destes sólidos de modo contínuo, sendo: Centrífuga de bojo tubular, Centrífuga de bojo compartimentado, Centrífuga de bojo imperfurado, Centrífuga de disco e Decantador.

Centrífuga de bojo tubular. Este tipo de centrífuga, utilizada a mais tempo do que outras, é de construção bem simples conforme apresentado na figura 3.3. Formada por um tubo com comprimento várias vezes o diâmetro girando em torno do seu eixo longitudinal. A mistura entra por uma extremidade na parte inferior saindo pela outra na parte superior. Os sólidos que são separados ficam presos na parede interna do bojo e lá permanecem até serem retirados manualmente, o que requer a desmontagem do mesmo. (SUTHERLAND, 2005).

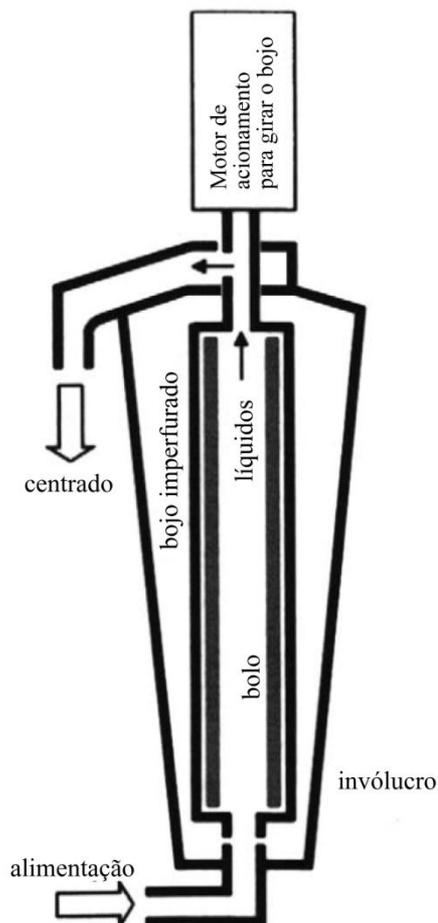


Figura 3.3 - Centrífuga de bojo tubular.
Fonte: Sutherland (2005).

Centrífuga de bojo compartimentado. A centrífuga de bojo compartimentado é efetivamente um arranjo de diversas centrífugas de bojo tubular, dispostas co-axialmente, figura 3.4. Ela possui um bojo principal com inserções cilíndricas que divide o volume do bojo em uma série de compartimentos anelares nos quais ocorrem a separação. A suspensão entra pelo centro e passa através dos compartimentos enquanto a distância do eixo vai aumentando, aumentando assim a força centrífuga, promovendo a classificação do material retido. Os maiores diâmetros são retidos nos compartimentos mais internos e a separação dos menores aumenta no sentido dos mais externos. A remoção dos sólidos é manual requerendo a parada do equipamento. As centrífugas de bojo tubular e compartimentado são projetadas para utilização quando a solução de entrada apresenta baixa concentração de material em suspensão, fazendo com que as paradas para limpeza sejam menos frequentes. (SUTHERLAND, 2005).

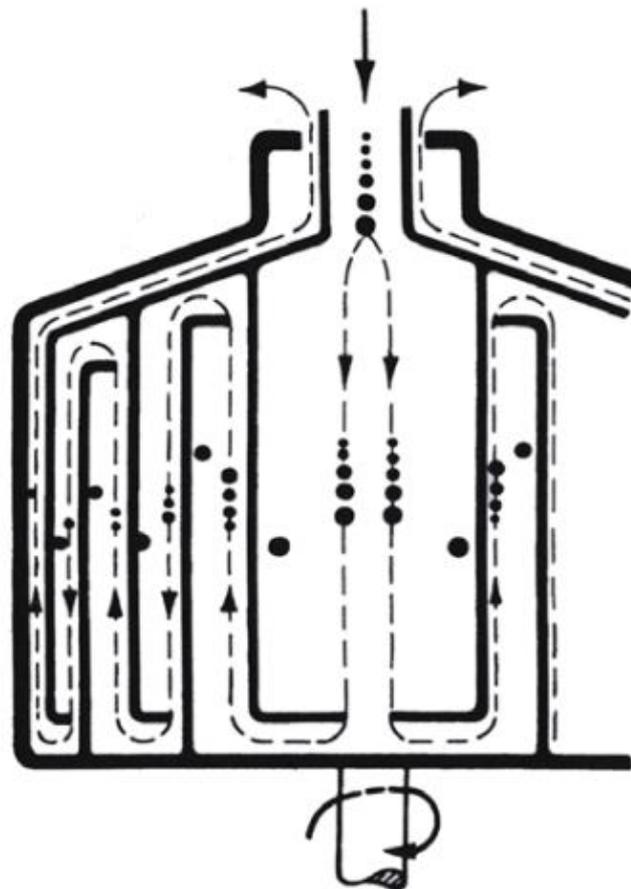


Figura 3.4 - Centrífuga de bojo compartimentado.
Fonte: Sutherland (2005).

Centrífuga de bojo imperfurado. Quando a quantidade de sólidos presentes é elevada, a centrífuga de bojo imperfurado pode ser utilizada para a separação de sólidos com razoável clareamento do líquido (nem todas as centrífugas deste tipo apresentam alta

eficiência na separação). Conforme figura 3.5, esta consiste num bojo em forma de tambor rodando em torno de um eixo vertical. Os sólidos acumulados no cesto são comprimidos pela força centrífuga mas não desaguados. Quando a rotação pára, o líquido remanescente é escoado e junto com ele perde-se uma parte dos sólidos retidos e a camada de sólidos pode ser removida manualmente com a auxílio de uma espátula. A descarga do retido também pode ser realizada de forma semi-automática, sem a necessidade de parada da máquina. Inicialmente utilizando um tubo sugador o líquido residual é sugado e depois com o auxílio de uma lâmina o sólido retido é removido. Como os sólidos retidos se apresentam ainda com uma certa quantidade de líquido, é possível que este seja sugado pelo mesmo tubo sugador. (SUTHERLAND, 2005).

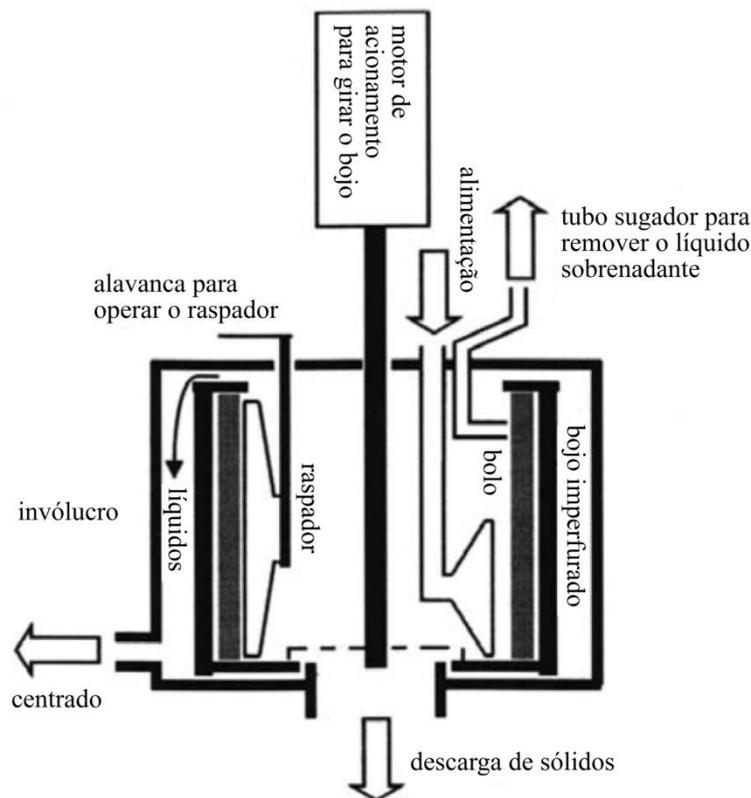


Figura 3.5 - Centrífuga de bojo imperfurado.
Fonte: Sutherland (2005).

Centrífuga de disco. Grandes quantidades de sólidos podem ser processadas em uma centrífuga trabalhando com uma pilha de discos separadores quando a descarga dos sólidos é feita de forma automática (Figura 3.6). Este tipo de equipamento teve como precursor a desnatadeira de Gustav de Laval que tomou sua forma atual com a adição de uma pilha de

discos cônicos dentro da qual ocorre a separação. A separação dos sólidos é muito eficiente, por causa da elevada força centrífuga, mas os sólidos se apresentam bastante saturados de líquido no ponto de descarga. Num projeto mais simples, esta centrífuga tem um bojo fechado contendo uma pilha de discos, e os sólidos coletados no bojo são retirados após a parada total do equipamento. Nas versões automáticas a descarga é feita na periferia do bojo, por diversos métodos, incluindo o uso básico de bicos que abrem continuamente permitindo a descarga de uma espessa camada de sólido retido. Os projetos mais complicados utilizam bicos valvulados que abrem automaticamente quando a camada de sólidos atinge uma configuração pré-definida, e se fecham assim que os sólidos são descarregados. A forma mais complexa utiliza uma abertura no próprio projeto do bojo na qual a concha do bojo se separa circunferencialmente, na parte mais larga da sua periferia, por um curto período, com a abertura também controlada pela camada de sólido dentro do bojo. (SUTHERLAND, 2005).

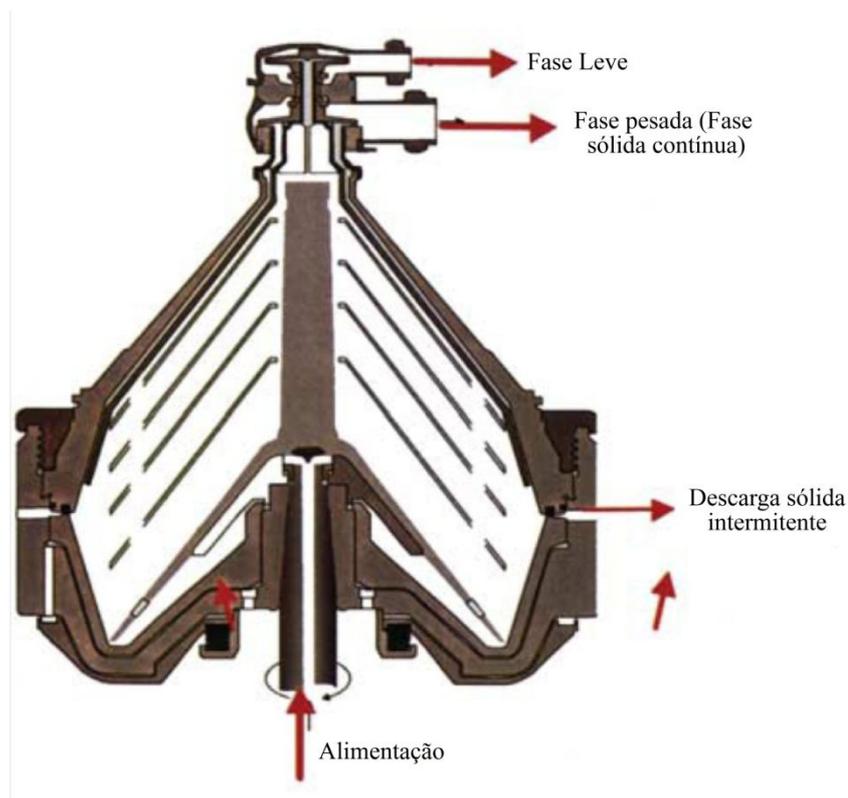


Figura 3.6 - Centrífuga de disco.
Fonte: Sutherland (2005).

Decantador. A centrífuga decantadora é a única centrífuga de sedimentação projetada para iniciar o processamento com uma significativa concentração de sólidos na suspensão de entrada (Figura 3.7). Ao mesmo tempo pode atingir um elevado grau de clareamento do

líquido centrado. Como qualquer centrífuga de sedimentação tem a parede do bojo sólida, mas aqui uma rosca sem fim movimentada lentamente os sólidos para o lado oposto ao da saída da descarga líquida, numa seção inclinada a qual age como uma zona de descarga sendo que a descarga do sólido é parcialmente desaguada. Níveis mais baixos de umidade podem ser obtidos com a utilização do decantador de bojo telado (Figura 3.8). Consideráveis simplificações no projeto tem alcançado uma produção de sólidos tão secos quanto possível. (SUTHERLAND, 2005).

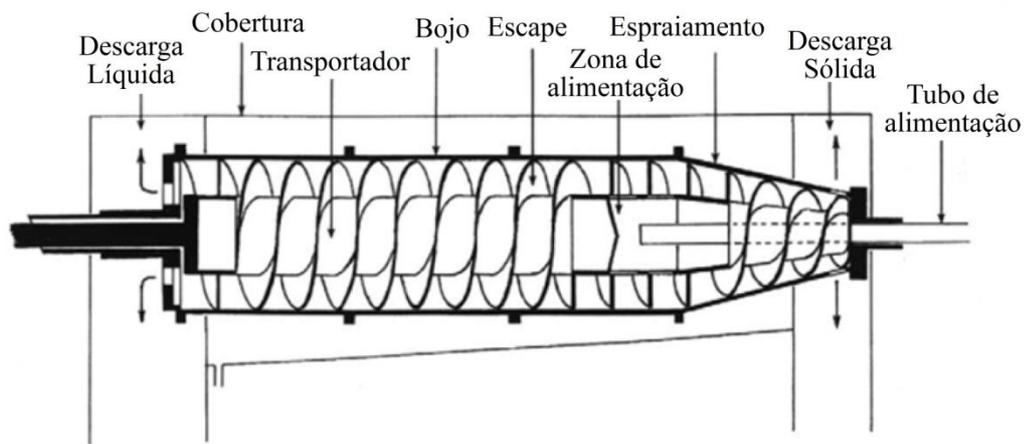


Figura 3.7 - Parte principal de uma centrífuga decantadora.
Fonte: Sutherland (2005).

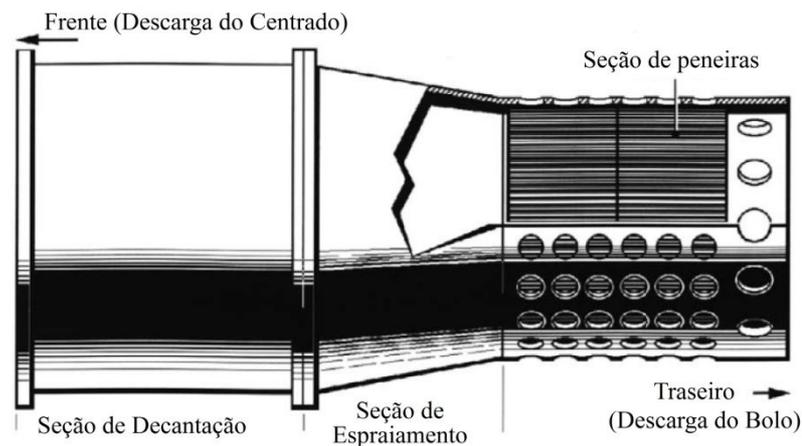


Figura 3.8 - Decantrador de bojo telado.
Fonte: Sutherland (2005).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Parâmetros para definição da centrífuga

O desenvolvimento de um novo rotor de centrífuga foi norteado principalmente pelos objetivos de utilização de baixa rotação, baixa força centrífuga, separação por faixas granulométricas e de baixo custo.

Desta forma, considerando que os principais fatores construtivos e operacionais que influenciam na eficiência de separação de sólidos em suspensão numa centrífuga são a rotação, o diâmetro de centrifugação e o tempo de detenção da amostra no interior da centrífuga, buscou-se desenvolver um projeto de rotor que fosse grande sem impedir que a centrífuga deixasse de ser portátil. Para compensar a baixa rotação e força centrífuga aplicada, o rotor desenvolvido teve como característica principal o aumento do tempo de detenção da amostra no seu interior.

O projeto de rotor de centrífuga foi desenvolvido partindo-se da concepção do processo de centrifugação no interior de uma tubulação.

A condição para a realização do processo de sedimentação centrífuga no interior de uma tubulação com a mistura água-sedimento em suspensão em movimento é de que o regime de escoamento no interior da tubulação seja laminar.

O tipo de escoamento no interior de um tubo pode ser representado pelo número de Reynolds. Para valores de Re até 2300 o escoamento é laminar, no intervalo de 2300 a 4000 o escoamento é de transição e acima de 4000 o escoamento é turbulento (CASEY, 2004).

O número de Reynolds é dado pela equação (4.1)

$$Re = \frac{u_e D \rho_L}{\mu} \quad (4.1)$$

onde u_e é a velocidade de escoamento do fluido no interior da tubulação, D o diâmetro do tubo, ρ_L é a densidade e μ a viscosidade do fluido.

Considerando um tubo girando como ilustrado na figura 4.1, o tempo t_s que a partícula mais afastada da superfície de sedimentação leva para atingir esta superfície pode ser expresso pela equação (4.2).

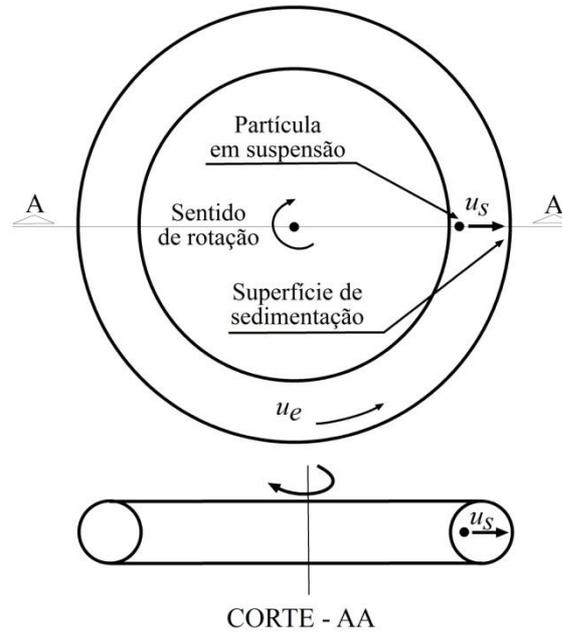


Figura 4.1 - Princípio de funcionamento do rotor de tubo.

$$t_s = D/u_s \quad (4.2)$$

onde u_s é a velocidade terminal de sedimentação para uma partícula de diâmetro d , calculada com base na lei de Stokes e que pode ser expressa pela equação (4.3).

$$u_s = \frac{r(\rho_s - \rho_L)}{\mu} \left(\frac{\pi d \Omega}{90\sqrt{2}} \right)^2 \quad (4.3)$$

A extensão Ex do percurso necessária para a sedimentação de todas as partículas de diâmetro d em suspensão num fluido percorrendo o tubo no interior da centrífuga com velocidade de escoamento igual a u_e pode ser expressa pela equação (4.4). O diâmetro d é o diâmetro de corte, isto é, o diâmetro da partícula acima do qual todas as partículas estarão sedimentadas.

$$Ex = u_e t_s = \frac{Re}{r\rho_L(\rho_s - \rho_L)} \left(\frac{\mu 90\sqrt{2}}{\pi d \Omega} \right)^2 \quad (4.4)$$

Para a temperatura de 20°C a água terá viscosidade dinâmica de 0,01002g.cm⁻¹.s⁻¹ e densidade de 0,998204g.cm⁻³. Adotando-se o diâmetro do tubo com valor igual a 1/2 polegada e o limite do regime de escoamento laminar, com $Re = 2300$, tem-se que a velocidade máxima de escoamento em regime laminar será $u_e = 18\text{cm.s}^{-1}$, o que corresponderá a uma vazão de 1,38L.min⁻¹ ou 82,9L.h⁻¹.

Uma centrífuga de tubo de 1/2 polegada, com raio de centrifugação igual a 20cm, girando a uma rotação de 800rpm, produzirá uma aceleração centrífuga G de apenas 143 vezes a aceleração da gravidade terrestre. E para uma solução de água com sólidos suspensos com densidade igual a 2,65g.cm⁻³, passando por esta tubulação com a velocidade $u_e = 18\text{cm.s}^{-1}$, todas as partículas com diâmetro d maior ou igual a 1 micrômetro estarão sedimentadas depois que esta solução percorrer a distância de percurso (Ex) de 17,96m.

A figura 4.2 mostra o desenho do rotor que atende a estas especificações e que pode ser construído enrolando-se um tubo sobre um cilindro de 40cm de diâmetro por 20cm de altura.

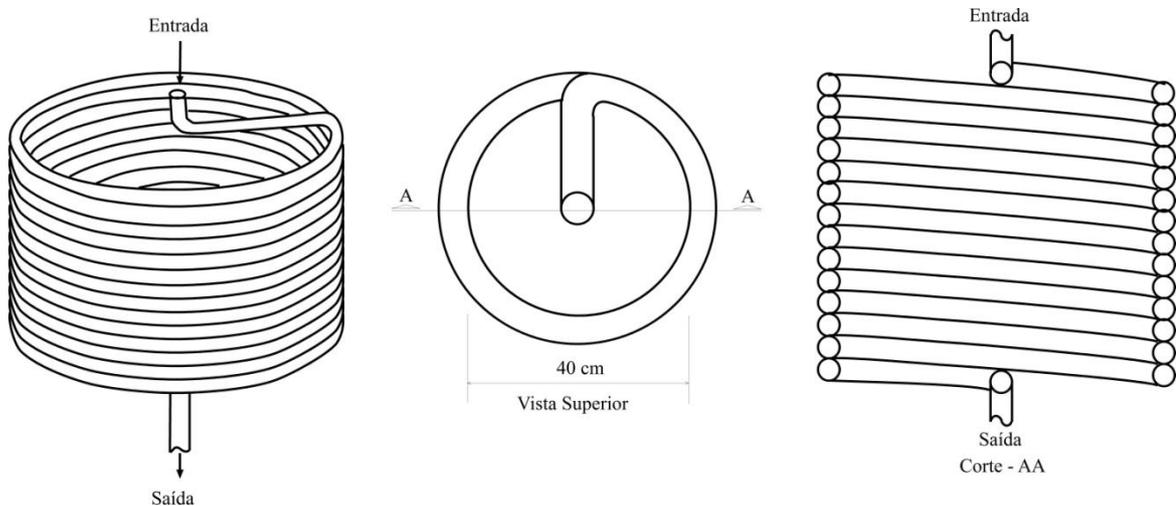


Figura 4.2 - Rotor de tubo helicoidal.

Para este rotor trabalhando com água, o efeito da viscosidade, de acordo com o número de Ekman, calculado pela equação (4.5) pode ser considerado maior que o valores sugeridos por Perry, Green e Maloney (1999) que são da ordem de 10^{-6} .

$$Ek = \frac{\mu/\rho}{\Omega L^2} = 4,67 \times 10^{-4} \text{ com valor de } L = 1,27\text{cm} \quad (4.5)$$

A espessura da camada de Ekman é dada equação (4.6).

$$\delta = \sqrt{\frac{(\mu/\rho)}{\Omega}} = 0,027 \text{ cm} \quad (4.6)$$

O efeito da inércia, de acordo com o número de Rosby, calculado pela equação (4.7) está dentro dos padrões esperados, da ordem de 1 (PERRY, GREEN e MALONEY, 1999).

$$Ro = \frac{u}{\Omega L} = 1,07 \quad (4.7)$$

O desenvolvimento do projeto de centrífuga que atenda às necessidades de amostragem de material particulado aquático em suspensão foi conduzido seguindo os princípios gerais aqui apresentados.

4.2. Planejamento experimental

Para avaliação da eficiência da centrífuga na remoção de sólidos em suspensão, foram identificadas as variáveis apresentadas na tabela 4.1 que de alguma forma tem influência no processo e que foram classificadas como variáveis geométricas, de material e de processo.

Tabela 4.1 - Variáveis interferentes no processo experimental.

Variáveis geométricas			
Símbolo	Descrição	Unidade	Dimensão
D	diâmetro do tubo	cm	L
r	raio de centrifugação	cm	L
Ex	extensão do tubo no interior da centrífuga	cm	L
Variáveis de material			
Símbolo	Descrição	Unidade	Dimensão
ρ_L	densidade da água	g.cm^{-3}	ML^{-3}
ρ_s	densidade da partícula	g.cm^{-3}	ML^{-3}
d	diâmetro da partícula	cm	L
μ	viscosidade da água	$\text{g.cm}^{-1}.\text{s}^{-1}$	$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$
Variáveis de processo			
Símbolo	Descrição	Unidade	Dimensão
u_e	velocidade de escoamento	cm.s^{-1}	LT^{-1}
Ω	velocidade angular	min^{-1}	T^{-1}
C_i	concentração inicial da amostra	g.cm^{-3}	ML^{-3}

As variáveis geométricas foram definidas pelo projeto e dimensionadas de forma a atender aos objetivos da centrífuga em termos de tamanho mínimo de retenção de material particulado em suspensão, velocidade de percurso e rotação de trabalho.

Os materiais escolhidos foram separados, classificados e tratados de forma que estes se mantivessem constantes durante cada experimento e ao longo de todos os experimentos realizados.

Para compor soluções sintéticas com características semelhantes preparou-se uma quantidade material particulado seco suficiente para a realização de todos os experimentos. Este material foi seco, peneirado e homogeneizado e suas características físicas como densidade média dos grãos e distribuição granulométrica foram determinadas segundo ABNT (1984) e GUI (1969), respectivamente. A temperatura da água de entrada foi mantida constante durante o experimento e para repetir esta temperatura nos diferentes experimentos, utilizou-se água com temperatura ambiente, considerando que foi observado que esta variação dentro do laboratório era muito pequena.

Os experimentos foram conduzidos variando-se a velocidade de escoamento, a rotação e a concentração inicial de material particulado em suspensão. Por questões operacionais a velocidade de escoamento foi medida indiretamente através da medida da vazão, que foi controlada pela regulagem da rotação da bomba por meio de um inversor de frequência, modelo CFW08, da marca Weg e medida com a utilização de provetas de polipropileno de 2000mL da marca Nalgon e cronômetro digital, modelo PC396, da marca Cronomax. A rotação da centrífuga foi controlada por um segundo inversor de frequência, modelo CFW08, da marca Weg e medida com a utilização de um foto tacômetro digital, modelo MDT2244B, da marca Minipa. A concentração inicial foi obtida adicionando-se a quantidade de material da amostra composta, pesada em balança analítica digital, modelo AUY220, da marca Shimadzu, em 50L de água filtrada da torneira.

Foram realizadas duas séries de experimentos. Numa das séries a eficiência da centrífuga foi avaliada medindo-se a massa seca de sólidos retidos pela centrífuga e na outra série a eficiência foi avaliada pela comparação entre a turbidez na entrada e na saída da centrífuga. Em ambos os casos, realizou-se um planejamento fatorial 3^3 sendo que na avaliação pela massa montou-se um planejamento fatorial fracionado do tipo cubo de face centrada, sem repetição e na avaliação pela turbidez trabalhou-se com um planejamento fatorial completo com repetição em triplicata. Optou-se por fazer a avaliação pela turbidez

pelo custo e rapidez do método, complementando assim os resultados dos experimentos realizados com medida de massa.

A representação dos pontos utilizados num planejamento fatorial 3^3 fracionado do tipo cubo de face centrada pode ser visualizada no desenho da figura 4.3.

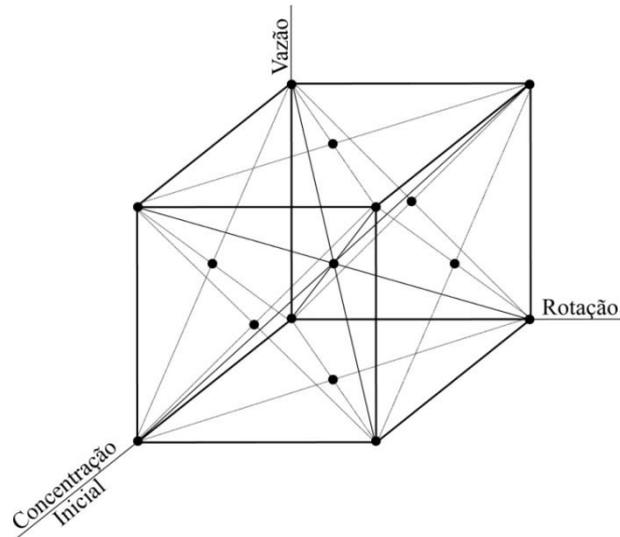


Figura 4.3 - Representação espacial do planejamento fatorial fracionado do tipo cubo de face centrada.

A tabela 4.2 apresenta a configuração do planejamento fatorial fracionado 3^3 , sendo que para a rotação foram aplicados os níveis 500, 800 e 1300rpm, para a vazão foram aplicados os níveis 1,3, 0,8 e 0,5L.min⁻¹ e para a concentração inicial foram aplicados os níveis 1300, 250 e 50mg.L⁻¹. Este planejamento foi aplicado aos experimentos realizados pelo método de avaliação das massas, correspondendo a 15 experimentos.

Tabela 4.2 - Configuração do planejamento fatorial fracionado do tipo cubo de face centrada.

Sequência de execução dos experimentos				
Rotação - Ω (rpm)	Vazão - Q (L.min ⁻¹)	Concentração Inicial - C _i (mg.L ⁻¹)		
		1300	250	50
500	1,3	2 ^o		8 ^o
800	1,3		13 ^o	
1300	1,3	3 ^o		5 ^o
500	0,8		14 ^o	
800	0,8	12 ^o	15 ^o	9 ^o
1300	0,8		11 ^o	
500	0,5	6 ^o		4 ^o
800	0,5		10 ^o	
1300	0,5	7 ^o		1 ^o

Para os experimentos realizados com base na turbidez medida na entrada e saída da centrífuga, foi utilizado o planejamento fatorial completo, o que corresponde à realização de todas as 27 combinações de níveis e fatores apresentadas na tabela 4.2.

A avaliação dos resultados foi feita através da determinação da eficiência da centrífuga na retenção do material particulado em suspensão adicionado à solução de entrada. Esta eficiência foi determinada de duas formas distintas, uma através da medida das massas e outra através da medida de turbidez. Na medida da massa a eficiência foi determinada pela relação entre a massa efetivamente retida no interior da centrífuga e a massa em suspensão efetivamente entrando na centrífuga ou como a relação entre a diferença de massas na entrada e na saída pela massa na entrada. Na medida de turbidez a eficiência foi determinada pela relação entre a diferença de turbidez medida na entrada e na saída pela turbidez na entrada.

Para comparar as eficiências utilizou-se de testes estatísticos de análise de variância (ANOVA) para comparar duas ou mais médias. Este testes foram realizados com o auxílio do software Graphpad Software (2003). A normalidade dos dados foi verificada com o teste de Kolmogorov-Smirnov e para verificar se as médias avaliadas tem o mesmo desvio padrão foi aplicado o teste de Bartlett para verificar se as médias provêm de populações com o mesmo desvio padrão.

4.3. Material utilizado na realização dos experimentos

Os experimentos realizados no Laboratório de Qualidade Ambiental (LAQUA) / UFMS utilizaram uma composição de solos recolhidos de diversos pontos do barranco do Rio Miranda na região do Passo do Lontra e também de um tipo de latossolo vermelho coletado na região de planalto na Bacia do Rio Coxim.

Para preparar o material a ser utilizado como fonte de sedimentos para a realização dos experimentos em laboratório, utilizou-se de 4 tipos de solo, onde preparou-se uma amostra única num volume suficiente para realizar todos os testes.

Estes solos foram secos a 105°C em estufa com circulação e renovação de ar, modelo MA035, da marca Marconi, destorroados e passados na peneira de malha 230 (0,0625mm).

O material seco, passado na peneira de malha 230 foi colocado num recipiente, em partes iguais, e homogeneizado. Para este material, utilizado em todos os experimentos realizados em laboratório, foi determinada a densidade dos grãos através do método do picnômetro (ABNT, 1984) e também a curva de distribuição granulométrica utilizando o método da pipetagem (GUI, 1969).

4.4. Medida dos volumes

O volume de água utilizado no experimento foi de 50L, medido com proveta de polipropileno de 2000mL, da marca Nalgon, e adicionado no tanque de entrada, gerando o valor de V_E (Volume adicionado na entrada).

O volume retido na alimentação foi medido despejando-se o conteúdo remanescente desde o reservatório até o registro de entrada da centrífuga num becker de polipropileno de 2000mL e medido numa proveta de 500mL, gerando o valor de V_A (Volume retido na alimentação).

Quando os sólidos retidos na centrífuga foram retirados o volume de solução remanescente no seu interior foi medida obtendo-se o volume V_C (Volume retido na centrífuga).

O efluente da centrífuga foi medido, contabilizando-se ao final o volume V_S (Volume na saída).

O erro experimental na medida dos volumes pode ser determinado subtraindo-se do volume de entrada os volumes retidos na alimentação, na centrífuga e o volume contabilizado na saída, equação (4.8).

$$V_E - V_A - V_C - V_S = \text{Erro experimental na medida dos volumes.} \quad (4.8)$$

4.5. Medida das massas

A determinação de Sólidos Totais, Sólidos Dissolvidos e em Suspensão foram realizadas de acordo com Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, método 2540 (APHA; AWWA; WEF, 2005).

A massa adicionada com a água (M_{ES} = Massa de sólidos em suspensão na entrada) foi determinada pesando-se em balança analítica, modelo AUY220 da marca Shimadzu, a quantidade de solo necessária para obter a concentração inicial desejada de sólidos em suspensão.

A massa de sólidos em suspensão retida na alimentação (M_{AS}) foi recolhida lavando-se o sistema de alimentação desde o reservatório de entrada até a entrada da centrífuga. Este material depois de seco foi pesado e corrigido para os sólidos dissolvidos.

O material retido no interior da centrífuga depois de recolhido e seco foi pesado e corrigido para os sólidos dissolvidos, obtendo-se o valor da massa de sólidos em suspensão efetiva na centrífuga (M_{CSE}).

Depois do material retido na centrífuga ser recolhido o rotor foi lavado e os sólidos remanescentes no seu interior foram recolhidos, secos e pesados obtendo-se a quantidade de massa de sólidos em suspensão não aproveitada na centrífuga (M_{CSN}).

A massa de sólidos em suspensão na saída (M_{SS}) foi determinada de forma indireta através da determinação da concentração de sólidos em suspensão na saída multiplicada pelo volume na saída V_S .

O erro experimental na medida das massas pode ser determinado subtraindo-se da massa de entrada as massas retidas na alimentação, na centrífuga e a massa contabilizada na saída, equação (4.9).

$$M_{ES} - M_{AS} - M_{CSE} - M_{CSN} - M_{SS} = \text{Erro experimental na medida das massas.} \quad (4.9)$$

4.6. Eficiência pela medida das massas

Para a execução dos experimentos as análises necessárias foram executadas de acordo com técnicas tradicionais e os experimentos foram montados de forma que ao final do processo fosse possível avaliar o erro experimental bem como determinar a eficiência da centrífuga.

O experimento realizado em laboratório para avaliar a eficiência da centrífuga na separação do material particulado aquático em suspensão, pela medida das massas, foi montado conforme o esquema apresentado na figura 4.4.

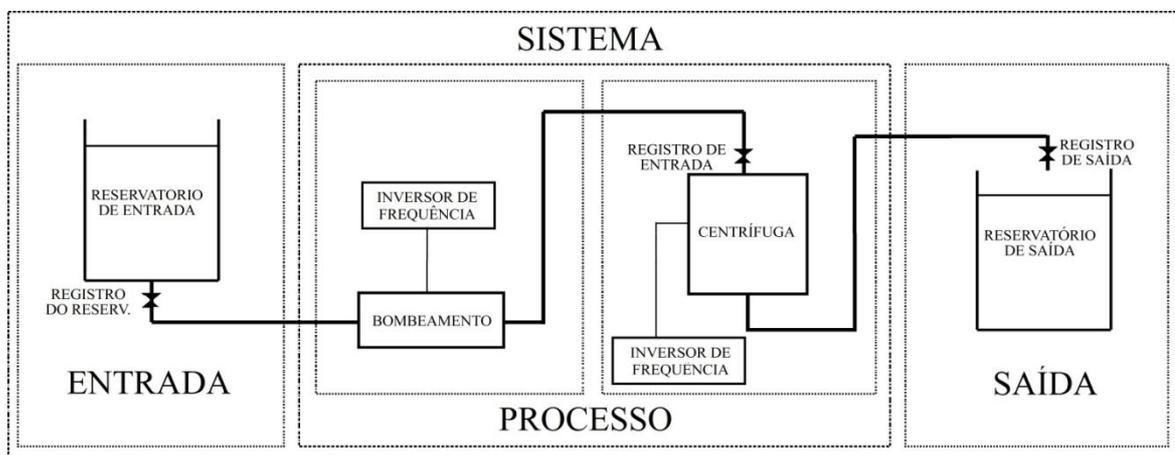


Figura 4.4 - Fluxograma do experimento para medida da massa.

No reservatório de entrada foi instalada na parte inferior uma saída com um registro de esfera de 1/2 polegada, conectado a um sistema de bombeamento por meio de uma mangueira com diâmetro de 1/2 polegada. O sistema de bombeamento foi conectado à centrífuga por meio de uma mangueira de 1/2 polegada. Na entrada da centrífuga foi instalado um registro de esfera de 1/2 polegada e na saída uma mangueira de 1/2 polegada que conduzia o efluente centrado até o reservatório de saída. No final desta mangueira foi também instalado um registro de esfera de 1/2 polegada.

Para a realização do experimento os procedimentos operacionais foram seguidos sempre obedecendo a sequência: a) Abrir o registro do reservatório; b) Abrir o registro de saída; c) Ligar a centrífuga e ajustar a frequência para a rotação de trabalho; d) Abrir o registro de entrada da centrífuga; e) Ligar a bomba e ajustar a frequência para a vazão de trabalho; f) Acionar o cronômetro e anotar a hora de início do processo; g) Após o término,

fechar todos os registros na ordem inversa do fluxo; h) Desligar a bomba; i) Desligar a centrífuga de forma lenta e gradual; e j) Desligar o cronômetro anotando o tempo gasto.

Antes de se iniciar o processo retirou-se uma amostra para determinação de sólidos totais e dissolvidos na água antes de se adicionar os sólidos para compor a solução de entrada.

Durante o processamento a amostra foi agitada continuamente com a utilização de um agitador manual e foram coletadas quatro amostras na saída, depois de processados 10L, 20L, 35L e no final, para determinação das concentrações de Sólidos Totais e Sólidos Dissolvidos.

A temperatura da água na entrada e saída foi monitorada no início e a cada 10L processados.

Após o término do processo foram medidos os volumes remanescentes na entrada, no bombeamento, na centrífuga e na saída. Também foram quantificados os sólidos em suspensão remanescentes na entrada e no sistema de bombeamento. Na centrífuga foram quantificados os sólidos retidos e considerados aproveitáveis para efeito de análises e os sólidos não aproveitáveis recolhidos na lavagem da centrífuga. Os sólidos em suspensão na saída foram estimados através da concentração de Sólidos Totais e Dissolvidos encontrados na saída do sistema e do volume medido na saída.

A quantificação destas massas e volumes permitiu avaliar o erro experimental através do balanço de massas e volumes.

A eficiência efetiva da centrífuga na retenção dos sólidos em suspensão foi determinada pela relação entre a massa de sólidos em suspensão efetiva recolhida na centrífuga (M_{CSE}) e a massa que efetivamente entrou na centrífuga, isto é, a massa sólidos em suspensão adicionada na entrada (M_{ES}) menos a massa de sólidos em suspensão retida na alimentação (M_{AS}), equação (4.10)

$$Ef_e = M_{CSE} / (M_{ES} - M_{AS}) \quad (4.10)$$

4.7. Eficiência pela medida da turbidez

Para medir a turbidez na entrada da centrífuga foi instalada uma saída para amostragem antes da entrada da centrífuga. Desta forma, a configuração física para realização dos experimentos utilizando a medida da turbidez foi modificada de acordo com o esquema apresentado na figura 4.5.

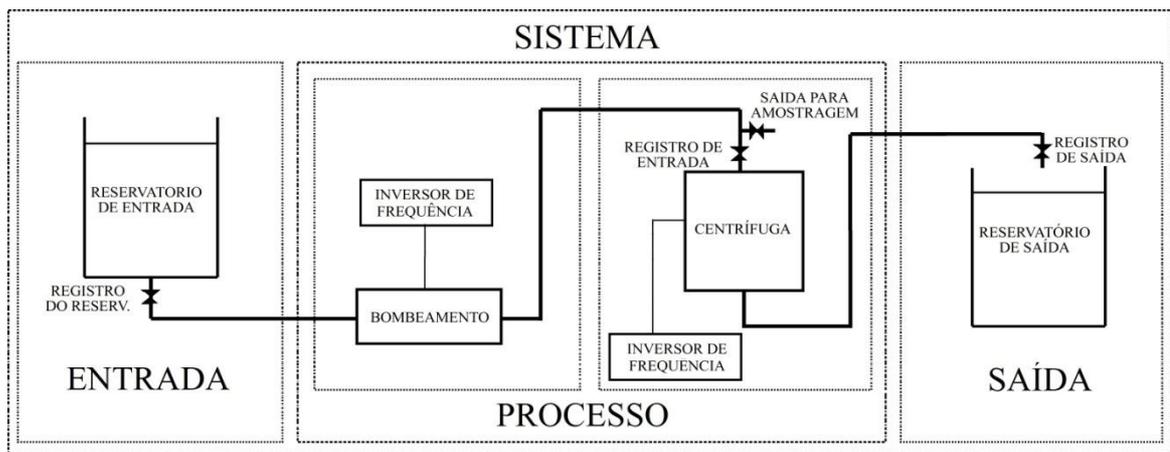


Figura 4.5 - Fluxograma do experimento para avaliação pela turbidez.

O experimento foi conduzido retirando-se uma amostra na entrada e uma amostra na saída depois de transcorrido o tempo necessário para centrifugar um volume igual ao volume da centrífuga. O volume na saída foi medido utilizando-se uma proveta de polipropileno de 2000mL, da marca Nalgon, e o tempo para recolher esse volume foi cronometrado, possibilitando assim determinar a vazão correspondente àquela amostragem.

Os resultados desta série de experimentos permitiu avaliar a eficiência da centrífuga na redução da turbidez, equação (4.11), para as condições de rotação, vazão e concentração inicial planejadas.

$$E_{fT} = 1 - (TS / TE) \quad (4.11)$$

4.8. Avaliação da eficiência energética do sistema

O sistema composto pela centrífuga mais a alimentação foi submetido a testes hidráulicos para avaliar seu funcionamento em diversas condições de vazão e rotação e o consumo energético foi medido de forma a poder determinar a energia gasta na obtenção de determinada massa de sólidos em suspensão.

Na configuração do experimento montado em laboratório foram instalados dois sensores de pressão, um antes do sistema de bombeamento e outro na entrada da centrífuga. Na saída do sistema foi instalado um hidrômetro e na alimentação do sistema foram monitorados a tensão e corrente elétrica.

Para medir o consumo de energia foi utilizado um Multímetro Digital, modelo ET2082B, da marca Minipa e um Alicata Amperímetro, modelo ET4090, da marca Minipa.

Para medir as pressões e vazões do sistema, nas simulações realizadas, foi utilizado um Datalogger de Pressão e Vazão (Pulso), modelo DMP-01-DPP, da marca Lamon em conjunto com um Hidrômetro Unijato Classe Metrológica C, modelo Altair, da marca Ciasey com Sensor Emissor de Sinal Modular.

A rotação da centrífuga foi medida com a utilização de um Foto Tacômetro Digital, modelo MDT2244B, da marca Minipa.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O desenvolvimento do rotor de centrífuga baseou-se no princípio da sedimentação acelerada pela passagem da solução água mais sedimento em suspensão no interior de uma canalização em movimento circular. O projeto teve sua concepção inicial no rotor de tubo helicoidal e a partir daí foi desenvolvido o rotor de tubos axiais que foi utilizado como amostrador de sedimentos capaz de reter e promover a separação dos grãos por tamanho/densidade permitindo a retirada do material retido separado por faixas granulométricas.

5.1. Centrífuga de tubo helicoidal

A ideia apresentada no item 4.1 foi testada através da construção de um protótipo com raio de centrifugação de 22,2cm que foi montado com a utilização do cesto de uma máquina de lavar roupas. Ao redor deste cesto foi enrolada uma mangueira de 1/2 polegada. A figura 5.1a mostra uma visão geral do protótipo I.

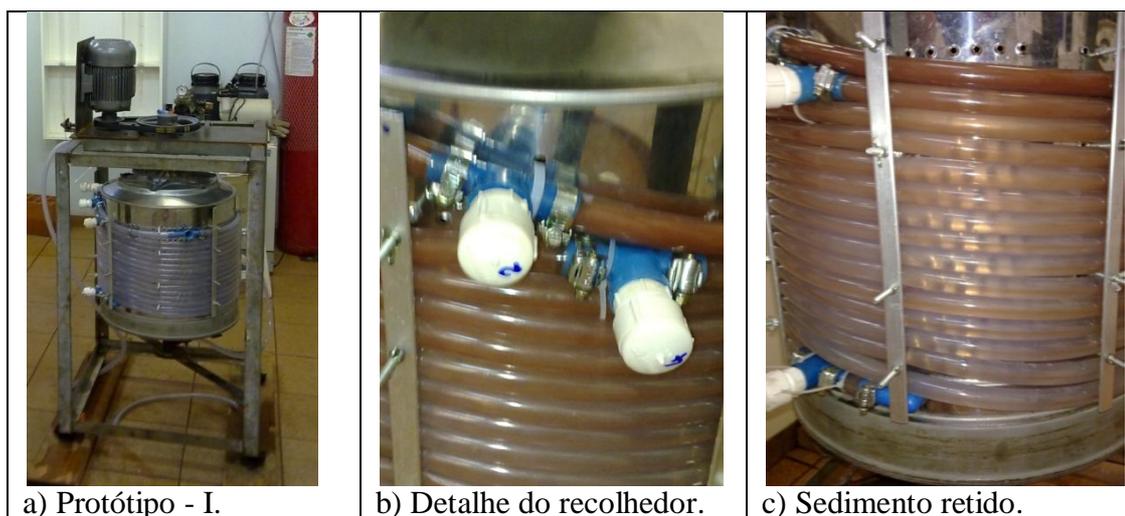


Figura 5.1 - Protótipo I - centrífuga de tubo helicoidal.

Neste primeiro protótipo foram instalados dispositivos recolhedores de sedimento, figura 5.1b. Sete recolhedores de sedimento foram distribuídos ao longo do percurso sendo o primeiro posicionado no início e a partir daí foram instalados mais 6 recolhedores nas

posições 12cm, 51cm, 154cm, 781cm, 1624cm e 2093cm do início do percurso. Conforme pode ser observado na figura 5.1c o sedimento vai se acumulando ao longo do percurso.

O grande problema enfrentado na operação deste protótipo foi recolher o sedimento retido no interior da centrífuga. Apesar desta dificuldade, foram realizados alguns testes para verificar o funcionamento deste sistema.

Assim, foram realizados três testes em laboratório nas seguintes condições: concentração do sedimento na entrada da centrífuga igual a 300mg.L^{-1} , vazão de $0,9\text{L.min}^{-1}$, correspondendo a uma velocidade de fluxo de $11,84\text{m.s}^{-1}$ com Re igual a 1498 (portanto em regime de escoamento laminar) e rotação de 600rpm (aceleração centrífuga de 89 vezes a aceleração da gravidade).

Nestas condições foram obtidos resultados de concentração de sedimentos em suspensão na saída de $27,5\text{mg.L}^{-1}$, $38,9\text{mg.L}^{-1}$ e $41,4\text{mg.L}^{-1}$, apresentando eficiência de 86,25%, 80,55% e 79,30% o que corresponde a uma eficiência média na remoção de sólidos em suspensão igual a 82,03% com coeficiente de variação de 4,5%.

Estes resultados mostraram a viabilidade do processo. Entretanto, a dificuldade na recuperação do material retido impossibilitou uma melhor avaliação da centrífuga no que diz respeito à sua capacidade de separação do material em suspensão por faixas granulométricas. A figura 5.2 permite avaliar visualmente a concentração de material retido em cada um dos 7 recolhedores. A baixa recuperação de material nos recolhedores finais e a mistura que ocorreu no momento de retirar o material entre os primeiros que estavam mais próximos, inviabilizou a avaliação da separação por tamanhos/densidade.



Figura 5.2 - Material amostrado nos 7 recolhedores.

Tendo-se em vista as características de funcionamento da centrífuga de tubo helicoidal, foi proposta a sua utilização como sistema de pré-tratamento de águas naturais

visando a redução de sólidos em suspensão. Considerando o ineditismo deste projeto foi feito um pedido de patente do rotor de tubo helicoidal como sistema de pré-tratamento de água.

Seguindo o mesmo princípio de funcionamento da centrífuga de tubo helicoidal foi desenvolvido um desenho inédito de rotor que permitisse a recuperação do material retido no seu interior, separando-o por tamanho/densidade.

5.2. Centrífuga de tubos axiais

O desenvolvimento de um rotor inédito que atendesse a condição de sedimentação no interior de um tubo longo o bastante para sedimentar até as partículas com diâmetros na faixa de 1 a $2\mu\text{m}$, trabalhando sob a ação de uma força centrífuga inferior a 300 vezes a força da gravidade, e que possibilitasse a retirada das partículas acumuladas no seu interior, levou ao desenho de um rotor com tubos dispostos axialmente, conforme figura 5.3. Estes tubos foram interligados sequencialmente por canais horizontais na parte inferior e superior. Estes canais se transformam em condutos fechados quando cobertos por tampas removíveis fixadas na parte superior e inferior do rotor.

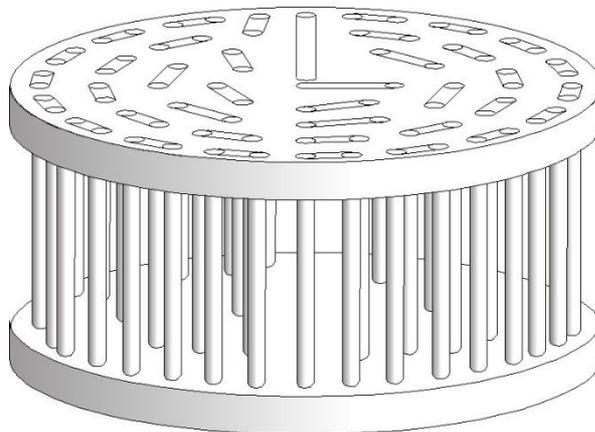


Figura 5.3 - Rotor de tubos axiais.

O formato básico para este rotor de centrífuga utilizando esta disposição de tubos paralelos ao eixo de rotação permite a configuração de muitas combinações podendo definir, em projeto, a maneira como a força centrífuga vai atuar sobre a amostra à medida que esta caminha no seu interior. Desta forma, é possível aplicar uma força centrífuga constante durante todo o processo ou ir variando esta força começando da menor e terminando com a

maior e vice-versa. Também é possível fazer com que a força centrífuga aumente e diminua durante o processo. Tudo isso utilizando sempre uma mesma rotação.

O desenho da figura 5.4 apresenta uma vista superior de um rotor onde o processo se inicia pelos tubos mais internos e caminha sempre num mesmo sentido. A força centrífuga vai aumentando à medida que a amostra vai atingindo os tubos mais externos e o processo oposto ocorre invertendo-se o sentido do fluxo.

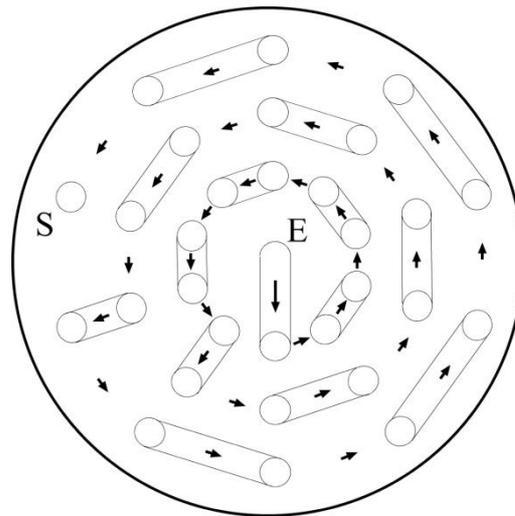


Figura 5.4 - Rotor com sentido de caminhamento único e força centrífuga crescente.

A figura 5.5 mostra o desenho de um rotor, visto pela parte superior, onde a amostra inicia o processo pelos tubos mais internos e à medida que passa aos tubos mais externos inverte o sentido de caminhamento. A força centrífuga vai aumentando do início para o final do processo.

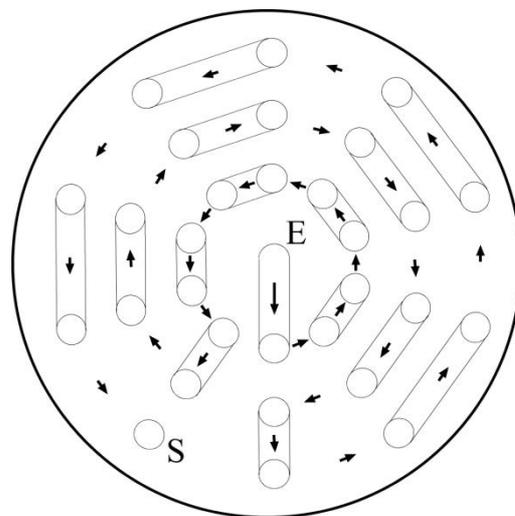


Figura 5.5 - Rotor com sentido de caminhamento alternado e força centrífuga crescente.

A figura 5.6 apresenta um desenho do rotor em vista superior onde a amostra caminha num único sentido e a força centrífuga é alternada.

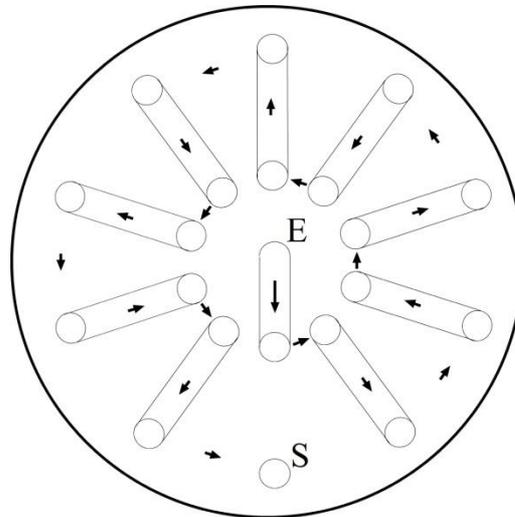


Figura 5.6 - Rotor com sentido de caminhamento único e força centrífuga alternada.

Nas figuras 5.4 a 5.6 a entrada e saída da amostra ocorre num mesmo lado do rotor, isto é, na parte de cima. Entretanto em qualquer caso é possível fazer com que a saída seja na parte de baixo do rotor.

Este tipo de rotor apresenta como principais vantagens em relação ao projeto inicial (rotor de tubo helicoidal) a possibilidade de recuperação do material depositado no interior do tubo separando-o por faixas de tamanho/densidade.

A extensão total do percurso é determinada pela extensão dos canais de ligação entre os tubos, pelo número de tubos e pela altura efetiva do rotor, isto é, a altura do rotor sem as tampas.

Para avaliar a eficiência deste tipo de centrífuga foi desenvolvido um projeto de rotor de tubos axiais com sentido de percurso alternado e força centrífuga crescente, semelhante ao esquema apresentado na figura 5.5. A tabela 5.1 apresenta as características do rotor utilizado para construção do Protótipo-II, com 75 tubos de 1cm de diâmetro distribuídos em 4 estágios com diferentes raios de centrifugação e com percurso total de 17m.

Tabela 5.1 - Características do rotor utilizado no protótipo-II.

	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3	Estágio 4
Raio de centrifugação (cm)	4,5	7,5	10,5	13,5
Número de tubos	6	11	23	35
Diâmetro do tubo (cm)	1,0	1,0	1,0	1,0
Extensão do tubo (cm)	141,2	259,3	520,5	780,1

Este rotor foi construído utilizando um cilindro maciço de nylon com diâmetro de 30cm e altura efetiva do rotor de 20cm. Para criar o percurso estabelecido pelos tubos e canais uma tampa removível foi fixada na parte superior, com uma abertura no centro para a entrada da amostra. Da mesma forma foi fixada outra tampa na parte inferior com uma abertura no centro para a saída da amostra.

A figura 5.7a mostra uma vista da parte superior do rotor com a posição dos tubos e canais de ligação entre eles. A vista do mesmo rotor pela parte de baixo é apresentada na figura 5.7b onde se visualiza a posição dos tubos, os canais de ligação e as cavidades laterais para retenção do sedimento.

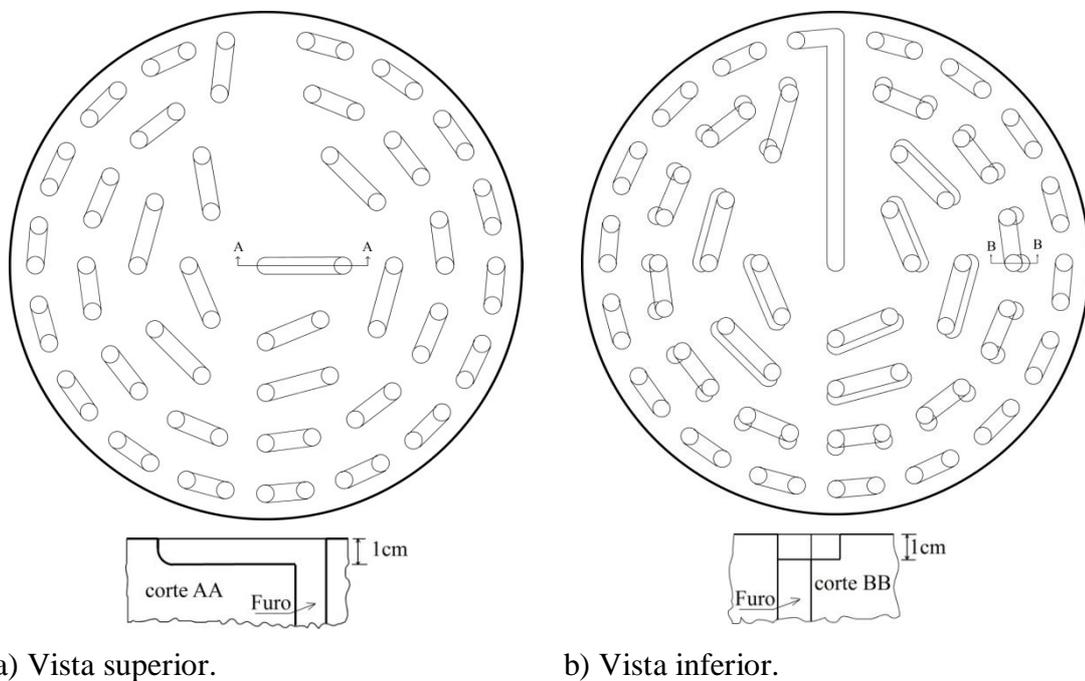


Figura 5.7 - Rotor de tubos axiais - vista em planta.

O rotor com as tampas foi montado sobre um suporte em cima de rolamentos com selo mecânico e conectado a uma polia acionada por correia através de um motor trifásico

controlado por um inversor de frequência. A figura 5.8 apresenta o Protótipo-II montado sobre um suporte de gerador.



Figura 5.8 - Protótipo-II

A recuperação do material retido no interior da centrífuga foi feito através da utilização de um extrator constituído pela tampa extratora, suporte giratório dos frascos e cavalete.

A tampa extratora foi confeccionada com 38 furos localizados sobre o centro do canal (entre dois tubos) na face superior do rotor e dispostos como mostrado na figura 5.9. Cada um destes furos recebeu uma mangueira capaz de conduzir o material retido na centrífuga para dentro dos frascos. Desta forma cada dois tubos descarregam sobre um ponto, com exceção do primeiro.

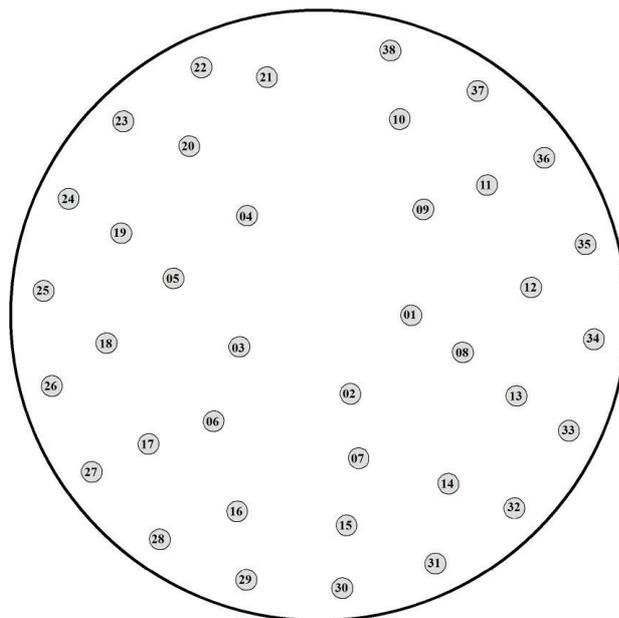


Figura 5.9 - Disposição dos furos na tampa extratora.

Para utilização da tampa extratora foi desenvolvido um suporte giratório capaz de acondicionar 26 frascos de 200mL. A figura 5.10 mostra a tampa extratora posicionada no suporte giratório já com os frascos vazios posicionados para receber a amostra.



Figura 5.10 - Tampa extratora posicionada no suporte giratório dos frascos.

Os 38 pontos de descarga do rotor foram conduzidos pelas mangueiras aos 26 frascos, sendo que os 14 primeiros frascos receberam um ponto cada um e os demais receberam dois. Esta distribuição pode ser visualizada pela numeração dos frascos mostrada na figura 5.11.



Figura 5.11 - Disposição dos 26 frascos.

Para recolher o material particulado retido no interior do rotor a tampa extratora é adaptada no lugar da tampa superior junto com o suporte giratório dos frascos. Este conjunto é então fixado num cavalete que permite que o conjunto todo gire. Quando o conjunto é girado os frascos, inicialmente posicionados em cima com a boca virada para baixo, ficam posicionados na parte inferior e o rotor na parte superior, figura 5.12. Neste momento, a água que se encontra acumulada no rotor é escoada para dentro dos frascos, levando junto parte do

material retido no seu interior. Para recuperar o máximo de material retido a tampa inferior é retirada e o rotor pode ser lavado com o auxílio de uma escova cilíndrica para lavagem e de um frasco lavador (pisseta) com água destilada. À medida que o rotor vai sendo lavado, o material retido vai sendo acumulado nos frascos.



Figura 5.12 - Suporte giratório dos frascos montado sobre o cavalete.

5.3. Caracterização do material utilizado

Quatro tipos de solo foram utilizados para compor a amostra utilizada nos experimentos realizados em laboratório. A Figura 5.13 apresenta a aparência visual dos quatro tipos de solos escolhidos, diluídos em água.



Figura 5.13 - Aspecto visual dos quatro tipos de solo.

A tabela 5.2 apresenta os valores de densidade dos solos utilizados na preparação do solo composto, que apresentou densidade média de $2,78\text{g.cm}^{-3}$.

Tabela 5.2 - Densidade dos solos que compõem a amostra.

Solos da amostra	Densidade do solo ρ_s (g.cm^{-3})
1	2,81
2	2,91
3	2,69
4	2,72
	2,78

Para determinação da curva de distribuição granulométrica do material utilizado nos experimentos utilizou-se o método da pipetagem, segundo descrito por Gui (1969).

A figura 5.14 apresenta as curvas granulométricas dos quatro tipos de solo e do solo composto utilizado nos experimentos.

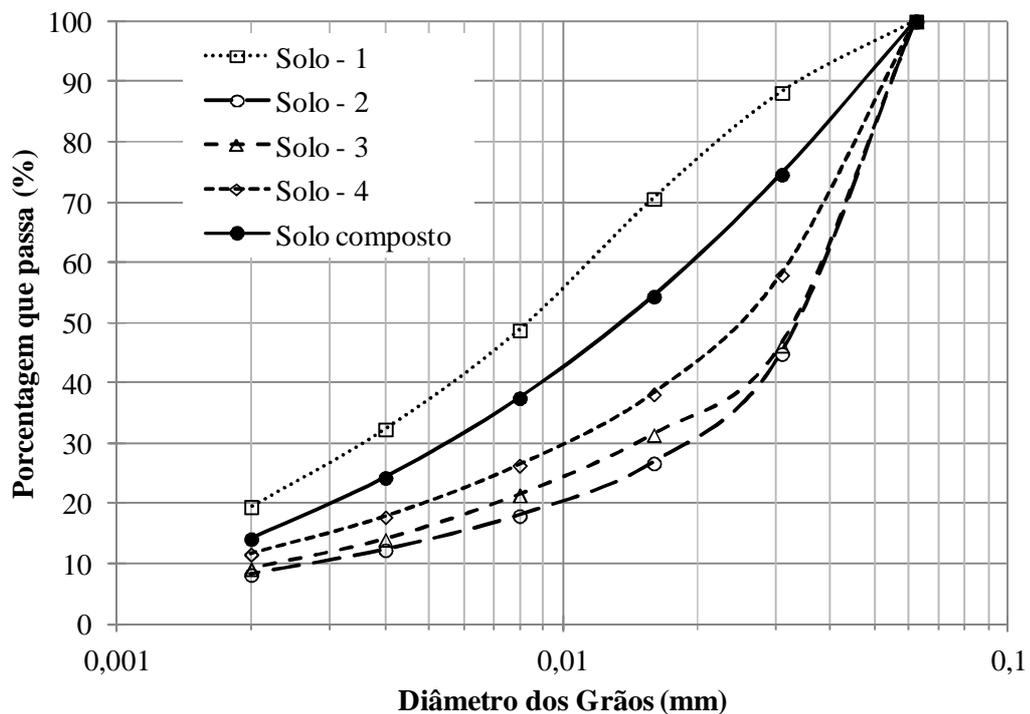


Figura 5.14 - Curva granulométrica do material da entrada.

5.4. Medida de massa

Os experimentos para avaliação da eficiência da centrífuga na retenção das massas foram realizados de acordo com a metodologia exposta no capítulo 4.

Inicialmente foram realizados 15 experimentos do tipo fatorial 3^3 variando-se os fatores rotação, vazão e concentração inicial em três níveis. Conforme apresentado na tabela 4.2 montou-se um experimento fatorial 3^3 fracionado do tipo cubo de face centrada cujos principais resultados são apresentados no Anexo A. Estes experimentos foram montados medindo-se as massas de material particulado em suspensão ao longo do processo, onde M_{ES} é a massa de sólidos adicionada, M_{AS} é a massa de sólidos em suspensão retida na alimentação da centrífuga, M_{CSE} é a massa de sólidos aproveitável retida pela centrífuga, M_{CSN} é a massa de sólidos não aproveitável retida pela centrífuga (massa recolhida na lavagem final do rotor e tampas da centrífuga) e M_{SS} é a massa de sólidos em suspensão na saída da centrífuga. As massas retidas na alimentação e na centrífuga foram medidas diretamente pesando-se toda a massa recolhida em balança analítica e a massa na saída foi estimada através da determinação da concentração de sólidos em suspensão no efluente centrifugado.

A eficiência efetiva da centrífuga na remoção de sedimento em suspensão (Ef_e) foi determinada pela relação entre a massa de sólidos aproveitáveis retidos na centrífuga (M_{CSE}) e a massa de sólidos em suspensão que entrou na centrífuga ($M_{ES} - M_{AS}$). Desta forma encontrou-se uma eficiência efetiva média de 68,4% com 95% de confiança da média se encontrar no intervalo de 64,5% a 72,4%.

Ao comparar as eficiências médias para os níveis aplicados a cada um dos fatores avaliados observou-se não haver diferença estatisticamente significativa entre elas. Foi utilizado o teste estatístico de comparação de duas médias através de análise de variância. O resultado da aplicação deste teste indicou que a diferença entre as médias pode ser considerada não significante com valor de p igual a 0,1195 para a rotação e 0,8134 para a vazão e considerada não muito significante com valor de p igual a 0,0895 para a concentração inicial. Foi aplicado o teste estatístico de Bartlett encontrando os valores 0,1086 com p igual a 0,9471 para a rotação, 0,8921 com p igual a 0,6401 para a vazão e 0,5001 com p igual a 0,7788 para a concentração inicial, indicando que as amostras provêm de populações com mesmo desvio padrão. Todos os dados passaram no teste de normalidade de Kolmogorov-

Semirnov. Estas análises foram realizadas ao nível de 5% de significância. (GRAPHPAD SOFTWARE, 2003).

As massas contabilizadas apresentadas no anexo A permitiram, através do balanço de massas, determinar o erro observado de cada experimento pela diferença do somatório das massas retidas na alimentação, na centrífuga e na saída com a massa adicionada. O erro relativo, determinado em relação à massa que entra, apresentou uma distribuição normal pelo teste de Kolmogorov-Smirnov com valor de KS igual a 0,21 e valor p de 0,0700 ao nível de significância de 5%. Aplicando-se o teste-t avaliou-se a hipótese do erro médio ser diferente de zero. O teste apresentou valor de p bicaudal $< 0,0001$, considerado extremamente significativo, com valor de t igual a 10,783 com 14 graus de liberdade. A diferença entre o erro médio e zero foi igual a 4,794% com 95% de confiança de se encontrar no intervalo de 3,840% a 5,748%.

Considerando que os resultados encontrados de eficiência efetiva da centrífuga medida pela retenção de massa de sólidos em suspensão não permitiram avaliar a influência da rotação, da vazão e concentração inicial no desempenho da centrífuga, foram realizados testes para avaliação da eficiência através de medidas da turbidez na entrada e na saída da centrífuga.

5.5. Medida de turbidez

Para avaliar a influência da rotação, da vazão e da concentração inicial na eficiência da centrífuga foram montados experimentos para avaliar a eficiência da centrífuga na redução da turbidez. Para isto, foi montado um planejamento fatorial 3^3 completo.

Foi realizada uma medida de tempo e volume entre cada amostra coletada para medida de turbidez na entrada e na saída, o que possibilitou determinar a vazão para cada medida de turbidez na entrada e saída da centrífuga.

Para o fator rotação foram adotados os níveis 500, 800 e 1300rpm, para o fator vazão foram adotados os níveis 0,5, 0,8 e 1,3L.min⁻¹ e para o fator concentração inicial foram adotados os valores 50, 200 e 600mg.L⁻¹.

As 27 combinações de três fatores em três níveis foram experimentadas em triplicatas, o que gerou um conjunto de 81 experimentos cujos resultados são apresentados no anexo B.

Na tabela 5.3 os valores medidos de vazão e turbidez de entrada estão representados pelas médias, juntamente com os desvios padrão e coeficientes de variação para os níveis baixo, médio e alto. Estes valores médios foram adotados para efeito de análise dos resultados obtidos.

Tabela 5.3 - Valores médios para os níveis baixo, médio e alto da vazão e turbidez de entrada.

	Níveis de vazão (L.min ⁻¹)			Níveis de turbidez de entrada (NTU)		
	baixo	médio	alto	baixo	médio	alto
Média	0,51	0,81	1,42	106	229	508
Desvio Padrão	0,021	0,050	0,038	20,10	52,17	88,73
Coefficiente de variação	4,2%	6,1%	2,7%	18,9%	22,7%	17,5%

No anexo C encontram-se os valores corrigidos para a turbidez de saída, calculada em função dos níveis adotados para a vazão (Qa) e turbidez de entrada (TEa). A turbidez de saída corrigida (TSc) foi calculada dividindo a turbidez de saída medida (TS) pelos valores medidos da vazão e turbidez de entrada (Q e TE) e multiplicando-a pelos valores adotados para a vazão e turbidez de entrada (Qa e TEa). A eficiência na redução da turbidez (E_r) foi calculada subtraindo a turbidez de saída corrigida da turbidez de entrada adotada e dividindo o resultado pela turbidez de entrada adotada.

Os dados apresentados no anexo C foram classificados segundo a rotação, a vazão e a turbidez de entrada e para cada uma dessas classificações foram montados os gráficos da figura 5.15 que apresentam as eficiências médias para cada nível de cada um dos três fatores estudados. Nestes gráficos podem ser visualizados os efeitos principais da rotação, turbidez e vazão sobre a eficiência da centrífuga na redução da turbidez com os limites inferior e superior do intervalo da média com 95% de confiança.

Para os 81 testes realizados a eficiência média encontrada pela medida turbidez foi de 79,6% com 95% de confiança da média se encontrar no intervalo de 75,7% a 83,5%.

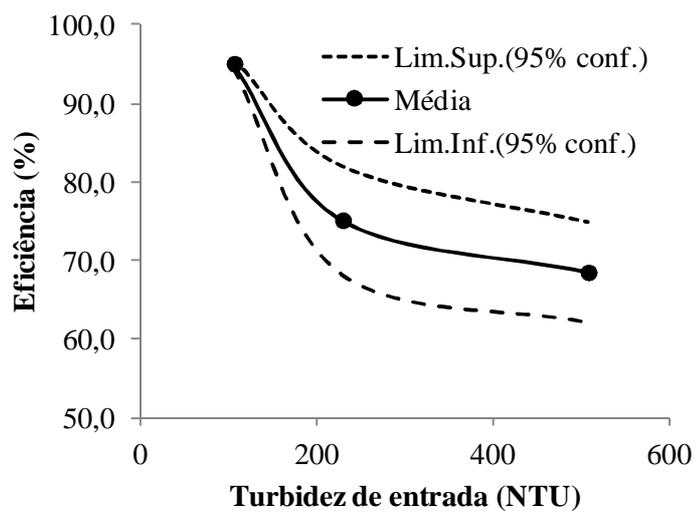
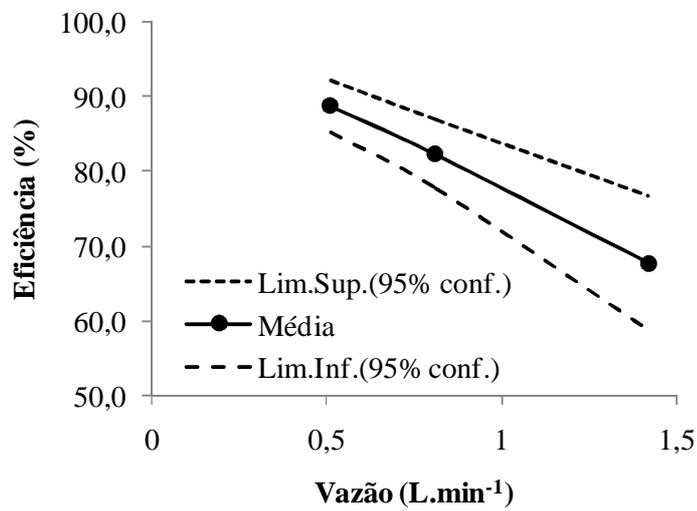
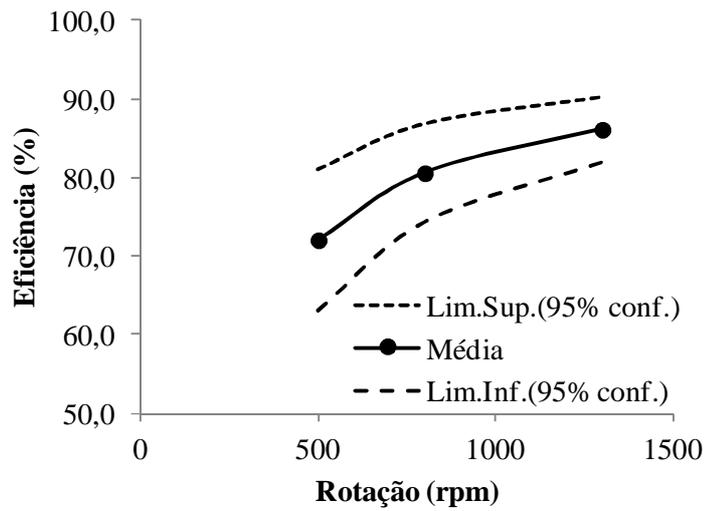


Figura 5.15 - Efeitos principais da rotação, vazão e turbidez de entrada sobre a eficiência.

Os intervalos de confiança mostram uma tendência de redução para rotações mais altas e para vazões e turbidez inicial menores, indicando que quando um fator aumenta a eficiência os outros passam a ter uma menor influência no processo.

Para os intervalos estudados para os fatores, observa-se que a eficiência é diretamente proporcional à rotação e inversamente proporcional à vazão e turbidez inicial, com valores de eficiência da ordem de 90% para as melhores condições de rotação, vazão e turbidez e valores da ordem de 70% nas piores situações.

O efeito principal de cada um dos fatores estudados sobre a eficiência pode ser comparado determinando-se a variação da eficiência a uma mesma variação relativa no fator avaliado. Assim, considerando os intervalos estudados para cada um dos fatores, encontramos um aumento de 15,0% na eficiência quando duplicamos a rotação. Quando duplicamos a vazão a eficiência é reduzida em 17,0% e quando duplicamos a turbidez de entrada a eficiência é reduzida em 11,7%. Indicando que o maior efeito causado na eficiência da centrífuga pode ser atribuído à vazão, seguido da rotação e turbidez de entrada. Embora tenha um menor impacto no resultado, a turbidez de entrada, que aqui representa a concentração inicial de sólidos em suspensão, tem uma influência significativa na eficiência da centrífuga.

O efeito observado sobre a eficiência da centrífuga devido à combinação dos fatores estudados pode ser melhor visualizado através dos gráficos apresentados na figura 5.16 onde para os valores mais elevados da rotação obtém-se maiores eficiências com menor variação para diferentes vazões e turbidez inicial. Da mesma forma, para os valores mais baixos de vazão foram obtidas as maiores eficiências com menor variação para diferentes rotações e turbidez inicial. E também para os valores mais baixos de turbidez inicial foram obtidas as maiores eficiências com menor variação para diferentes rotações e turbidez inicial. A menor variação na eficiência foi observada para o menor valor de turbidez inicial e a maior variação para o menor valor de rotação.

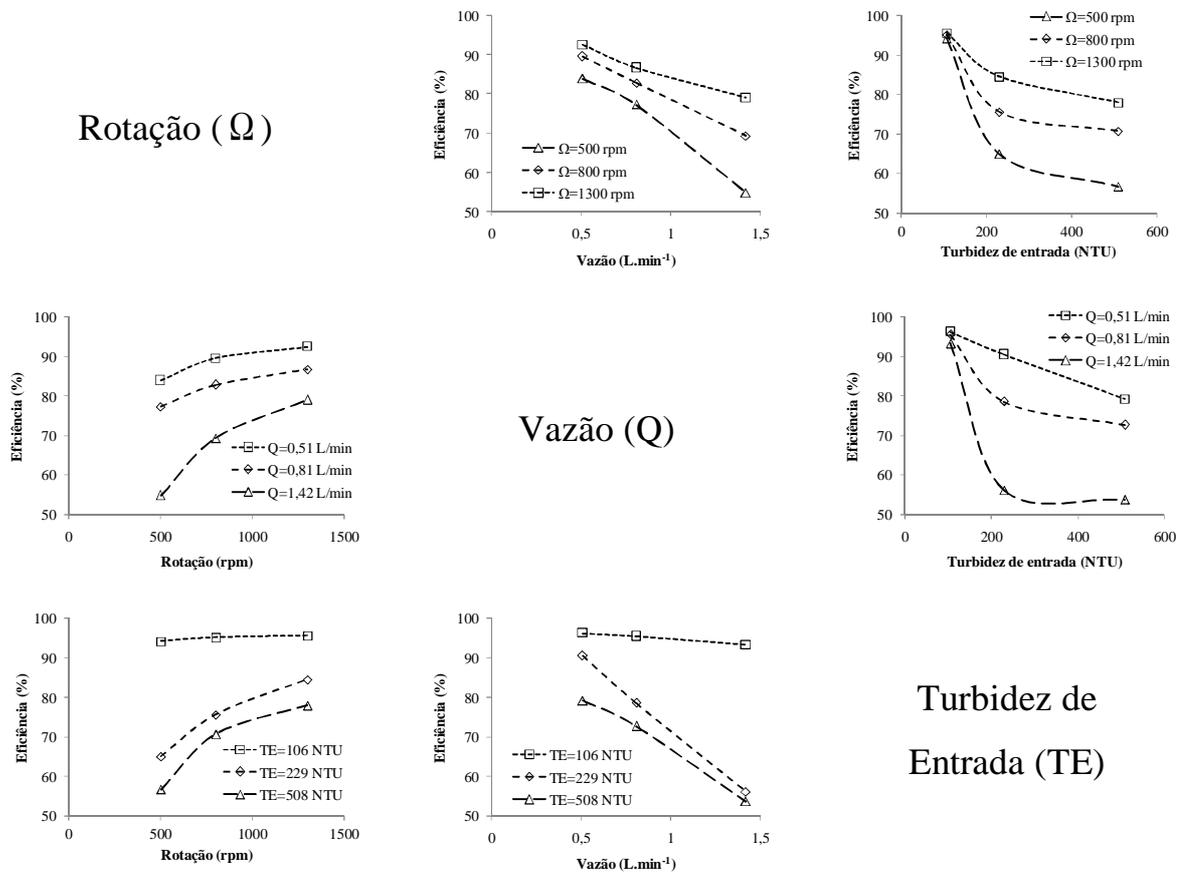


Figura 5.16 - Interação entre rotação, vazão e turbidez de entrada sobre a eficiência.

Uma questão que deve ser ressaltada é que a utilidade do equipamento em estudo é maior quando o transporte de sedimento em suspensão é baixo, e esta situação colabora com a maior eficiência da centrífuga.

5.6. Classificação do material em suspensão

Para verificar o grau de separação que o equipamento conseguiu promover foram feitas análises granulométricas do material retido em cada um dos quatro estágios.

O resultado destas análises estão representados através no gráfico da figura 5.17 onde os percentuais de material particulado em suspensão menor que 0,002mm encontrados foram de 5%, 17%, 26% e 53% para os estágios de 1 a 4, respectivamente. Os percentuais crescentes de material mais fino que 0,002mm para os estágios de 1 a 4 bem como somente a presença

de material particulado com granulometria inferior a 0,016mm no estágio 4 indicam que o rotor de tubos axiais está cumprindo com a sua função de separar o material por faixas granulométricas.

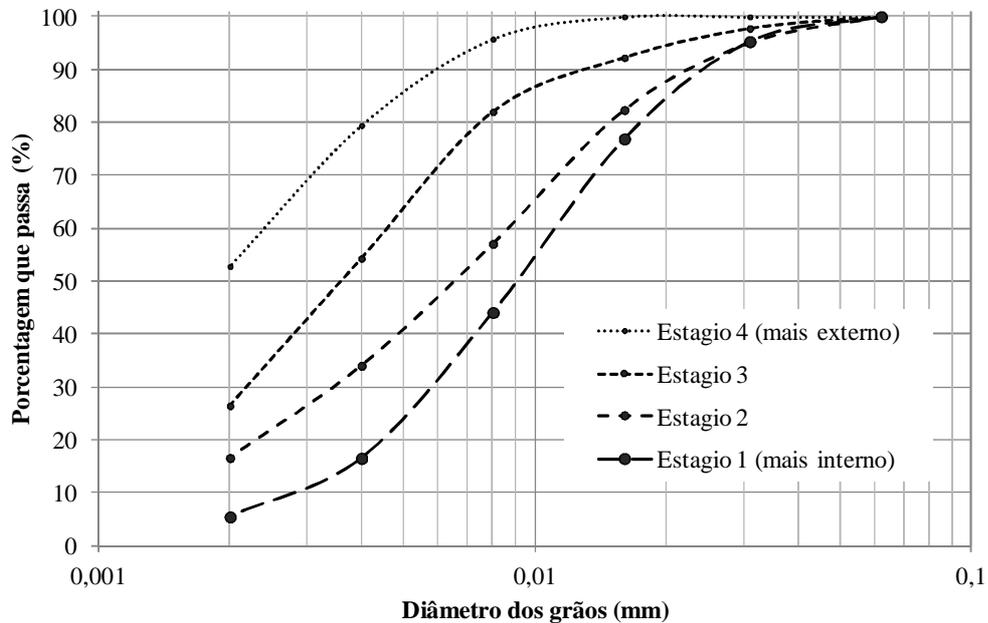


Figura 5.17 - Curvas granulométricas para os 4 estágios.

5.7. Resultados obtidos em teste de campo

No dia 9 de outubro de 2012 foi realizado um teste de amostragem de material particulado em suspensão no Rio Miranda, na região do Passo do Lontra na Base de Estudos do Pantanal da UFMS. A coleta foi realizada às 7:00h e o processamento da amostra foi iniciado às 7:55h e encerrado às 12:00h.

O material utilizado no teste foi coletado a 0,5m da superfície no canal principal do rio com profundidade de 2,5m. Os 150L de água coletados foram depositados em três reservatórios. Foi realizado um teste de peneiramento em uma amostra da água coletada utilizando uma peneira de abertura igual a 0,0625mm e não foi encontrado material nesta peneira.

O sistema foi ajustado para a rotação de 1300rpm e vazão de 0,5L.min⁻¹. Os 150L de água coletados do rio se encontravam na temperatura de 29°C assim permanecendo do início ao final do processo.

A turbidez registrada na água de entrada foi de 151NTU e a turbidez média de saída, registrada durante todo o processo a cada 5L processados foi de 70,4NTU com desvio padrão de 1,8 e coeficiente de variação de 2,5%, apresentando uma eficiência na redução da turbidez igual a 53,4%.

A amostra apresentou concentração de sólidos totais da ordem de 199mg.L^{-1} na entrada da centrífuga e de 144mg.L^{-1} na saída. A concentração de sólidos dissolvidos na entrada e saída foi de 130mg.L^{-1} e a concentração de sólidos em suspensão foi de 69 e 14mg.L^{-1} na entrada e saída respectivamente. Portanto a eficiência da centrífuga na retenção de massa de sólidos em suspensão foi da ordem de 79,7%, com massa total retida igual a 8250mg.

A massa retida na centrífuga foi extraída utilizando-se o extrator de 26 garrafas e esta amostra processada foi transferida para quatro recipientes que foram identificados de acordo com o estágio de retenção dos sólidos dentro da centrífuga. Com este material realizou-se as análises de granulometria pelo método da pipetagem cujos resultados para cada estágio estão apresentados no gráfico da figura 5.18.

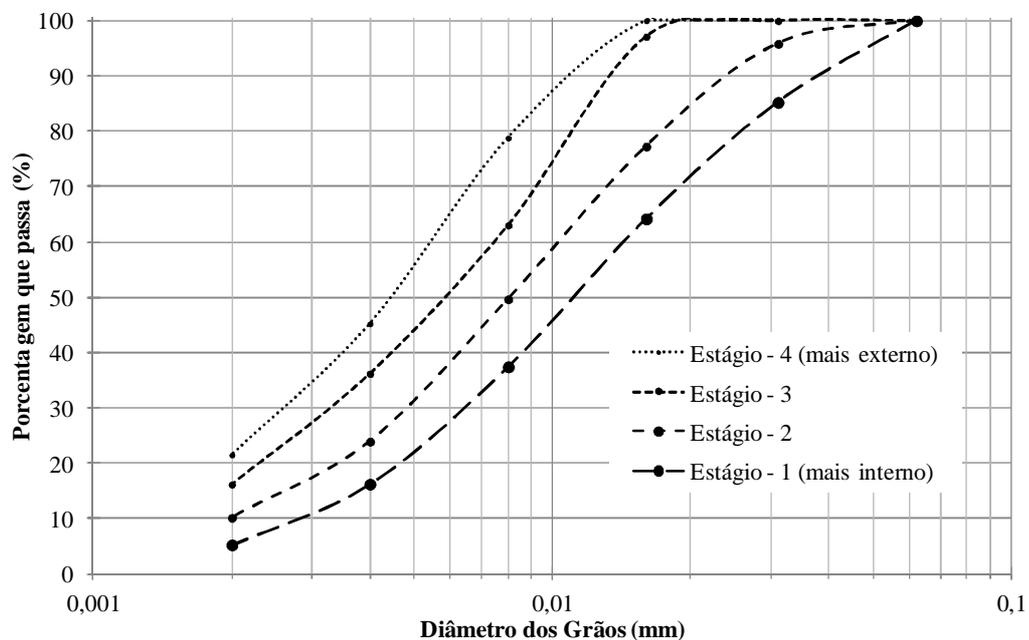


Figura 5.18 - Curvas granulométricas para os 4 estágios - Rio Miranda.

A semelhança entre os gráficos apresentados nas figuras 5.17 e 5.18 mostra o padrão característico do tipo de separação por faixas de tamanho/densidade promovida pela centrífuga.

Toda a massa recolhida e aproveitada na centrífuga e que foi utilizada para determinação das curvas granulométricas dos sólidos recolhidos em cada estágio foi seca e pesada. No estágio 1 foi recolhido 3230mg, no estágio 2 e no estágio 3 foram recolhidos 1570mg em cada um e 1010mg no estágio 4, totalizando 7380mg. Considerando que a concentração de sólidos em suspensão na entrada foi de 69mg.L⁻¹ a eficiência efetiva na retenção de massa foi de 71,3%.

Com os valores de massa seca em cada estágio e das curvas granulométricas da figura 5.18 foi possível montar a tabela 5.4 com as porcentagens retidas para cada faixa granulométrica por estágio. A soma dos quatro estágios permitiu determinar a porcentagem retida e a porcentagem que passa, representando a curva granulométrica para a amostra inteira.

Tabela 5.4 - Percentual de massa retida por estágio e por diâmetro.

Diâmetro (mm)	Estágio - 1 (%)	Estágio - 2 (%)	Estágio - 3 (%)	Estágio - 4 (%)	% Retida	% que passa
0,062						100,0
0,031	6,5	0,9	0,0	0,0	7,3	92,7
0,016	9,2	3,9	0,6	0,0	13,8	78,9
0,008	11,7	5,9	7,3	2,9	27,7	51,2
0,004	9,3	5,5	5,7	4,6	25,0	26,1
0,002	4,8	2,9	4,3	3,2	15,2	10,9
<0,002	2,3	2,2	3,4	2,9	10,9	
Total	43,8	21,3	21,3	13,6	100,0	

Na tabela 5.4 o total retido em cada estágio permite verificar que grande parte da massa ficou retida no estágio 1 onde se concentram quantidades maiores de massas com os diâmetros mais elevados.

Ainda, na tabela 5.4, pode ser observado que no estágio 4 só foi registrada a presença de material particulado em suspensão com diâmetros menores que 0,016mm, confirmando o resultado encontrado em laboratório.

Os diâmetros intermediários estão distribuídos de forma mais homogênea pelos quatro estágios enquanto que os diâmetros maiores se concentram nos estágios iniciais e os menores nos finais, conforme pode ser visualizado na figura 5,19.

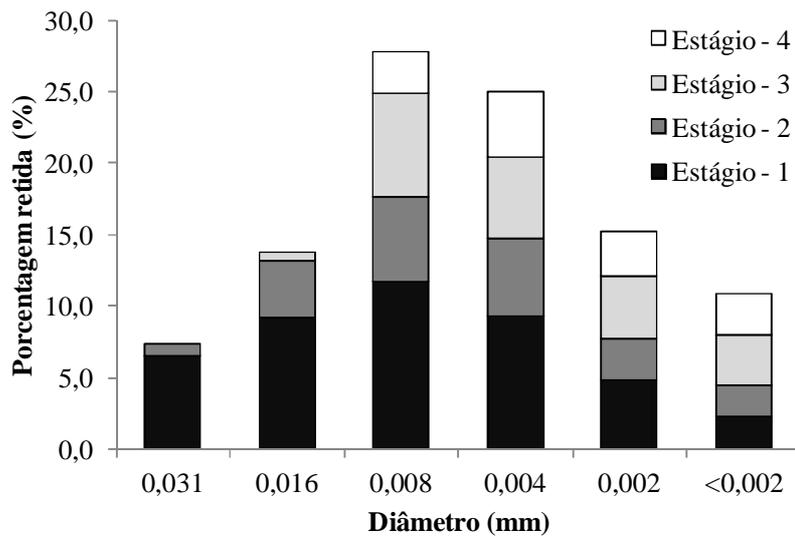


Figura 5.19 - Distribuição percentual da massa retida por diâmetro e por estágio.

5.8. Custos e eficiência energética

Para montagem do Protótipo-II os materiais adquiridos foram adaptados às necessidades do projeto, sendo que em determinados momentos foi necessário recorrer à utilização de materiais reaproveitados. O custo final do equipamento ficou em R\$5.500,00 sendo 80% correspondente aos custos com aquisição de materiais e 20% correspondendo ao pagamento de serviços.

O gasto de energia para recuperar uma determinada quantidade de massa de material particulado em suspensão está diretamente relacionado com a concentração que este material se encontra na amostra. Esta energia gasta também se relaciona com a condição de funcionamento da centrífuga. Quanto mais elevada a rotação e quanto maior a vazão, maior o consumo de energia no processo. A relação entre as rotações, vazões, e pressões na entrada da centrífuga podem ser visualizadas no gráfico da figura 5.20.

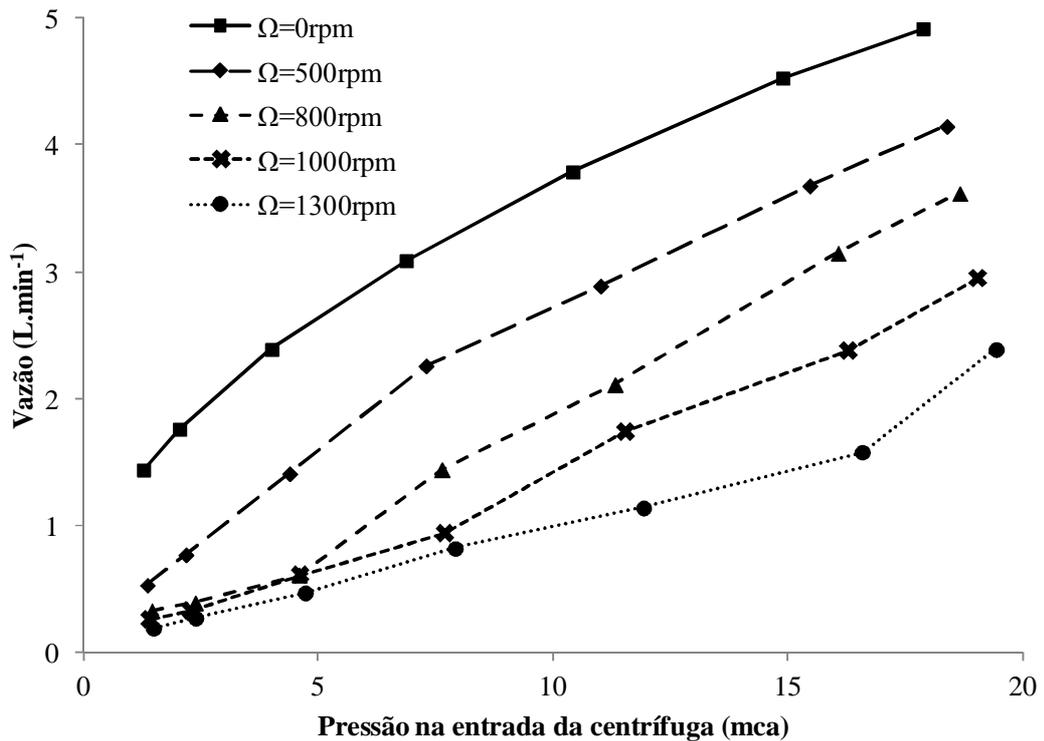


Figura 5.20 - Relação entre vazão e pressão na entrada da centrífuga em função da rotação.

Para se recuperar uma massa de 1g de material particulado em suspensão através do processo de centrifugação com a utilização do Protótipo-II, a energia gasta em função da concentração pode ser visualizada no gráfico da figura 5.21. Para este cálculo foram considerados a rotação de 1300rpm, a vazão de $0,5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ e a eficiência efetiva da centrífuga na retenção de material particulado em suspensão de 68,4%. Ainda para estas mesmas condições, o gráfico da figura 5.22 apresenta o tempo gasto e o volume de água amostrado por grama de material em suspensão recuperado em função da concentração da amostra.

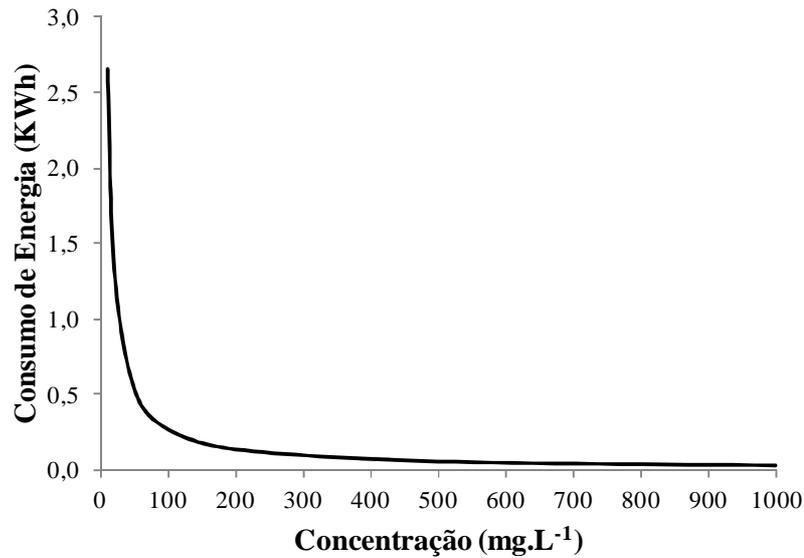


Figura 5.21 - Consumo de energia por grama de material em suspensão recuperado em função da concentração de sólidos em suspensão na entrada da centrífuga.

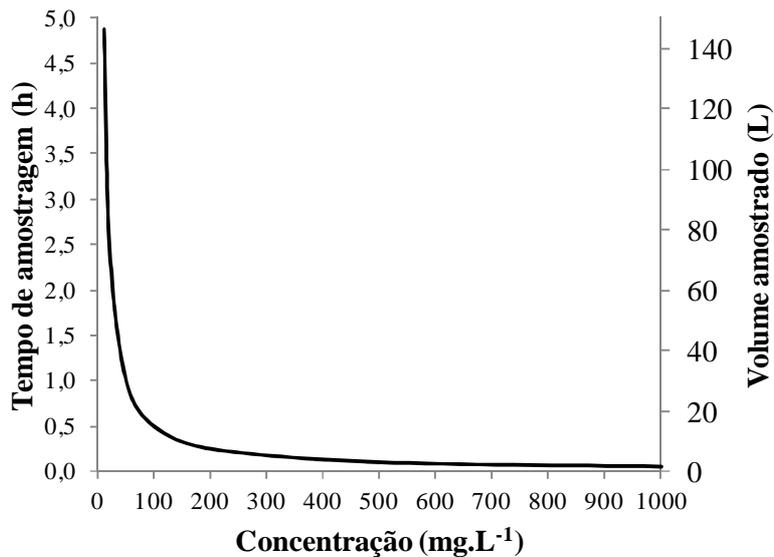


Figura 5.22 - Tempo gasto e volume amostrado para recuperar 1g de material em suspensão em função da concentração de sólidos em suspensão na entrada da centrífuga.

Conforme pode ser observado no gráfico das figuras 5.21 e 5.22 para a concentração de 50mg.L^{-1} serão gastos $0,5\text{kWh}$ e necessários cerca de 30L e 1hora de trabalho para cada grama de material em suspensão recuperado.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1. Conclusões

O rotor de tubo helicoidal, apresentou eficiência na retenção de sólidos em suspensão acima de 80%. Embora não tenha se mostrado adequado como amostrador de material particulado em suspensão apresentou características que permitem a utilização como sistema de pré-tratamento de água.

O rotor de tubos axiais atendeu como amostrador de material particulado em suspensão separando este material por diâmetro/densidade.

O diâmetro dos tubos axiais define a vazão máxima de projeto e a extensão do percurso, o raio de centrifugação e a rotação utilizada definem o diâmetro de corte.

Para uma centrífuga com o rotor de tubos axiais igual ao do Protótipo-II com rotações variando de 500 a 1300rpm, vazões variando de 0,5 a 1,5L.min⁻¹ e concentrações iniciais variando de 50 a 1300mg.L⁻¹ a eficiência média na retenção de material particulado em suspensão é de 68,4% com 95% de confiabilidade de se encontrar no intervalo entre 64,5 e 72,4%. E a eficiência média na redução da turbidez é de 79,6% com 95% de confiabilidade de se encontrar no intervalo entre 74,0 e 85,2%

A medida da eficiência pela turbidez mostrou que o fator com maior influência sobre a eficiência foi a vazão apresentando uma redução igual a 17,0% quando duplicada, seguida pela rotação que apresentou um aumento de 15,0% quando duplicada e depois pela turbidez inicial que apresentou uma redução em 11,7% quando esta foi duplicada.

Analisando-se a interação entre os fatores rotação, vazão e turbidez inicial, observou-se que a maior variação na eficiência ocorreu para o menor valor de rotação e a menor variação na eficiência ocorreu para o menor valor de turbidez inicial.

A separação do material particulado em suspensão por tamanho para a faixa com diâmetros inferiores a 0,002mm foi de 5%, 17%, 26% e 53% para os estágios de 1 a 4

respectivamente. No estágio 4 só foram encontrados materiais com diâmetros inferiores a 0,016mm e no estágio 3 só foram encontrados materiais com diâmetros inferiores a 0,031mm.

Os estágios iniciais acumulam maior quantidade de material de maior granulometria e as menores granulometrias se encontram distribuídas de forma mais uniforme entre os quatro estágios avaliados.

Em um teste de situação real de amostragem foi recuperado 7380mg de material particulado em suspensão em 150L de água com a eficiência efetiva da centrífuga na retenção de massa igual a 71,3%.

Para produzir o Protótipo-II foram gastos R\$5.500,00 com materiais e mão de obra.

Para recuperar um grama de matéria seca em uma amostra com 50mg.L^{-1} de concentração de material particulado em suspensão gasta-se 0,5kWh para processar 30L de amostra em uma hora.

6.2. Recomendações

Considerando a capacidade da centrífuga de recuperar materiais em suspensão utilizando pequena força de centrifugação, recomenda-se a investigação da sua utilização na amostragem de organismos aquáticos.

Avaliar a influência das variáveis de material (densidade e viscosidade da água e densidade, diâmetro e distribuição granulométrica das partículas) na eficiência da centrífuga.

Estudar a influência da aceleração centrífuga na distribuição granulométrica do material particulado em suspensão.

Investigar possíveis alterações nas concentrações de elementos químicos no material particulado em suspensão, devido ao impacto das partículas provocado por diferentes acelerações centrífugas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APHA; AWWA; WPCF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21th edition, Washington D.C., 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Grãos de solo que passam na peneira 4,8mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

CARVALHO, N.O. **Hidrossedimentologia Prática**. 2a ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 599 p.

CASEY, T.J. **Water and Wastewater Engineering Hydraulics**. Aquavarra Research Limited. Co. Dublin: October 2004, 137p.

CROSSAN, A.N.; LEE, N.; SHARMA, R.; KENNEDY, I.R.; BECKETT, R. **Assessment of the distribution of pesticides on soil particle fractions in simulated irrigation run-off using centrifugal SPLITT fractionation and ELISA**. *Analytica Chimica Acta*, v. 468, n. 2, p. 199-208, sep 2002.

DOUGLAS, G.B.; BECKETT, R.; HART, B.T. **Fractionation and concentration of suspended particulate matter in natural waters**. *Hydrological Processes*, v. 7, n. 2, p. 177-191, 1993.

GRAPHPAD SOFTWARE **GraphPad InStat**. Version 3.06, 32 bit for Windows. Trial Version. 2003.

GUI, H.P. **Laboratory Theory and Methods for Sediment Analysis**. In: **Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey**. United States Government Printing Office, Washington. 1969.

HIGGINS, J.A.; TROUT, J.M.; FAYER, R.; SHELTON, D.; JENKINS, M.C. **Recovery and detection of *Cryptosporidium parvum* oocysts from water samples using continuous flow centrifugation**. *Water Research*, v. 37, n. 15, p. 3551-3560, set. 2003.

HOROWITZ, A.J. **Comparison of methods for the concentration of suspended sediment in river water for subsequent chemical-analysis**. *Environmental Science & Technology*, v. 20, n. 2, p. 155-159, fev. 1986.

IDE, C.N. (Coordenador). Subprojeto 1.5 – **Distribuição e transporte de agroquímicos e metais pesados na Bacia do Alto Paraguai**. In: Projeto implementação de práticas de gerenciamento integrado de bacia hidrográfica para o Pantanal e Bacia do Alto Paraguai. Brasília: ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003.

LENNTECH, **Water Treatment Solutions. Centrifugation and Centrifuges**. <http://www.lenntech.com/library/clarification/clarification/centrifugation.htm>. pesquisado na internet em 25.02.2013.

MOODY, J.A.; MEADE, R.H. **Evaluation of the method of collecting suspended sediment from large rivers by discharge-weighted pumping and separation by continuous-flow centrifugation.** Hydrological Processes, v. 8, n. 6, p. 513-530, nov. 1994.

ONGLEY, E.D. **Quantitative recovery of solids suspended in a fluid using continuous flow centrifugation appts.** including mixing and splitting chambers. US4250752-A; CA1125052-A. 28 jun. 1979. 17 fev 1981. <http://www.freepatentsonline.com/4250752.html>.

PERRY, R.H.; GREEN, D.W.; MALONEY, J.O. **Perry's Chemical Engineers' Handbook.** 7th ed. DVD. McGraw-Hill, New York, 1999.

ROSSÉ, P; VIGNATI, D; DOMINIK, J. **Effects of continuous flow centrifugation on measurements of trace elements in river water:** intrinsic contamination and particle fragmentation. Hydrological Processes, v. 20, n. 13, p. 2745-2754, ago. 2006.

ROSTAD, C.E.; REES, T.F.; DANIEL, S.R. **Colloid particle sizes in the Mississippi River and some of its tributaries, from Minneapolis to below New Orleans.** Hydrological Processes, v. 12, n. 1, p. 25-41, 1998.

SANTIAGO, S.; THOMAS, R.L.; MCCARTHY, L.; LOIZEAU, J.L.; LARBAIGT, G.; CORVI, C.; ROSSEL, D.; TARRADELLAS, C. e VERNET, J.P. **Particle-size characteristics of suspended and bed sediments in the Rhone River.** Hydrological Processes, v. 6, n. 2, p. 227-240, 1992.

SUTHERLAND, K., **Centrifuge focus: solids removal - the option.** Filtration and separation, v.42, n.6, p. 16-20, Jul.-Aug. 2005.

UNECE - United Nations Economic Commission for Europe. **Technical report: guidance to operation of water quality laboratories.** Helsinki; UNECE; Sep. 2002. 94 p.

USEPA. **Developing water quality criteria for suspended and bedded sediments (SABS) - Potential Approaches.** Washington: USEPA, 2003.

ZUCKERMAN, U.; ARMON, R.; TZIPORI, S. e GOLD, D. **Evaluation of a portable differential continuous flow centrifuge for concentration of Cryptosporidium oocysts and Giardia cysts from water.** Journal of Applied Microbiology, v. 86, n. 6, p 955-961, jun 1999.

ZUCKERMAN, U.; TZIPORI, S. **Portable continuous flow centrifugation and method 1623 for monitoring of waterborne protozoa from large volumes of various water matrices.** Journal of Applied Microbiology, v. 100, n. 6, p. 1220-1227, jun. 2006.

ANEXOS

ANEXO A - Resultados dos experimentos medidos através das massas.

Exp.	Ω rpm	Q L.min ⁻¹	Ci mg.L ⁻¹	M _{ES} g	M _{AS} g	M _{CSE} g	M _{CSN} g	M _{SS} g
1	1300	0,5	50	2,500	1,134	0,885	0,158	0,239
2	500	1,3	1300	65,000	12,455	36,071	5,910	6,104
3	1300	1,3	1300	65,000	11,197	40,150	3,474	7,091
4	500	0,5	50	2,500	0,999	0,914	0,208	0,240
5	1300	1,3	50	2,500	0,106	1,336	0,362	0,643
6	500	0,5	1300	65,000	25,939	29,280	3,357	2,399
7	1300	0,5	1300	65,000	22,603	29,452	7,134	1,395
8	500	1,3	50	2,500	0,503	1,284	0,195	0,474
9	800	0,8	50	2,500	0,701	1,365	0,175	0,119
10	800	0,5	250	12,500	6,061	4,203	0,596	0,924
11	1300	0,8	250	12,500	2,909	6,046	2,006	0,835
12	800	0,8	1300	65,000	13,148	42,115	5,322	3,126
13	800	1,3	250	12,500	3,423	6,966	1,059	0,448
14	500	0,8	250	12,500	4,125	5,102	1,842	0,879
15	800	0,8	250	12,500	4,213	5,763	1,198	0,544

ANEXO B - Resultados dos experimentos medidos através da turbidez.

Replica	Ω (rpm)	Q (L.min ⁻¹)	Ci (mg.L ⁻¹)	TE (NTU)	TS (NTU)
1	500	0,60	50	117	4,02
1	500	0,51	200	186	25,3
1	500	0,53	600	402	108
1	500	0,68	50	102	5,97
1	500	0,81	200	185	69,3
1	500	0,80	600	425	127
1	500	1,28	50	119	8,85
1	500	1,44	200	225	136
1	500	1,40	600	575	435
1	800	0,49	50	110	4,49
1	800	0,50	200	187	9,9
1	800	0,50	600	429	75,8
1	800	0,86	50	103	5,05
1	800	0,88	200	214	36,4
1	800	0,86	600	462	155
1	800	1,42	50	138	9,25
1	800	1,47	200	255	116
1	800	1,44	600	603	210
1	1300	0,50	50	108	4,01
1	1300	0,52	200	206	15,2
1	1300	0,50	600	449	54,7
1	1300	0,78	50	120	4,66
1	1300	0,79	200	241	26,7
1	1300	0,76	600	491	108
1	1300	1,39	50	136	7,38
1	1300	1,44	200	252	66,9
1	1300	1,35	600	570	139
2	500	0,51	50	78,7	3,71
2	500	0,51	200	184	33,7
2	500	0,52	600	415	125
2	500	0,88	50	94,3	4,44
2	500	0,79	200	208	64,7
2	500	0,80	600	470	142
2	500	1,45	50	119	8,37
2	500	1,43	200	247	143
2	500	1,42	600	722	475
2	800	0,51	50	95,2	3,31
2	800	0,50	200	209	16
2	800	0,50	600	456	109
2	800	0,89	50	102	4,33
2	800	0,86	200	232	42,2
2	800	0,86	600	467	120
2	800	1,41	50	108	7,95
2	800	1,43	200	266	146

Replica	Ω (rpm)	Q (L.min ⁻¹)	Ci (mg.L ⁻¹)	TE (NTU)	TS (NTU)
2	800	1,45	600	595	268
2	1300	0,53	50	92,6	2,71
2	1300	0,52	200	218	8,72
2	1300	0,50	600	459	66,6
2	1300	0,82	50	108	3,84
2	1300	0,79	200	234	23,3
2	1300	0,76	600	489	113
2	1300	1,47	50	117	9,86
2	1300	1,44	200	322	96,3
2	1300	1,39	600	568	153
3	500	0,53	50	75,2	3,31
3	500	0,52	200	197	28,7
3	500	0,53	600	416	131
3	500	0,80	50	80,3	4,3
3	500	0,80	200	218	58,7
3	500	0,79	600	444	132
3	500	1,42	50	130	9,9
3	500	1,40	200	284	153
3	500	1,40	600	597	412
3	800	0,50	50	70,4	2,73
3	800	0,50	200	201	14,5
3	800	0,50	600	433	79,9
3	800	0,86	50	88,9	3,72
3	800	0,85	200	137	44,1
3	800	0,86	600	491	121
3	800	1,46	50	150	6,54
3	800	1,43	200	341	125
3	800	1,41	600	723	316
3	1300	0,51	50	79,4	2,17
3	1300	0,50	200	140	9,06
3	1300	0,50	600	457	57,9
3	1300	0,78	50	113	3,34
3	1300	0,77	200	251	26,1
3	1300	0,77	600	524	137
3	1300	1,42	50	117	5,67
3	1300	1,41	200	353	114
3	1300	1,39	600	594	168

ANEXO C - Turbidez de saída ajustada para os valores adotados de vazão e turbidez de entrada.

Replica	Ω (rpm)	Q_a (L.min ⁻¹)	TEa (NTU)	TSc (NTU)	Ef _T (%)
1	500	0,51	106	3,1	97,1
1	500	0,51	229	30,9	86,5
1	500	0,51	508	130,8	74,3
1	500	0,81	106	7,4	93,0
1	500	0,81	229	85,4	62,7
1	500	0,81	508	152,8	69,9
1	500	1,42	106	8,7	91,8
1	500	1,42	229	136,5	40,4
1	500	1,42	508	389,4	23,3
1	800	0,51	106	4,5	95,7
1	800	0,51	229	12,3	94,6
1	800	0,51	508	91,9	81,9
1	800	0,81	106	4,9	95,4
1	800	0,81	229	35,8	84,4
1	800	0,81	508	160,2	68,5
1	800	1,42	106	7,1	93,3
1	800	1,42	229	100,8	56,0
1	800	1,42	508	175,1	65,5
1	1300	0,51	106	4,0	96,2
1	1300	0,51	229	16,7	92,7
1	1300	0,51	508	63,2	87,6
1	1300	0,81	106	4,3	96,0
1	1300	0,81	229	25,9	88,7
1	1300	0,81	508	119,2	76,5
1	1300	1,42	106	5,9	94,4
1	1300	1,42	229	59,9	73,8
1	1300	1,42	508	130,4	74,3
2	500	0,51	106	5,0	95,3
2	500	0,51	229	42,1	81,6
2	500	0,51	508	151,1	70,3
2	500	0,81	106	4,6	95,6
2	500	0,81	229	72,9	68,2
2	500	0,81	508	155,0	69,5
2	500	1,42	106	7,3	93,1
2	500	1,42	229	131,4	42,6
2	500	1,42	508	334,0	34,2
2	800	0,51	106	3,7	96,5
2	800	0,51	229	18,0	92,2
2	800	0,51	508	124,2	75,5
2	800	0,81	106	4,1	96,1
2	800	0,81	229	39,3	82,9
2	800	0,81	508	122,6	75,9

Replica	Ω (rpm)	Q_a (L.min ⁻¹)	TEa (NTU)	TSc (NTU)	Ef _T (%)
2	800	1,42	106	7,9	92,6
2	800	1,42	229	124,7	45,5
2	800	1,42	508	224,7	55,8
2	1300	0,51	106	3,0	97,2
2	1300	0,51	229	9,1	96,0
2	1300	0,51	508	75,2	85,2
2	1300	0,81	106	3,7	96,5
2	1300	0,81	229	23,5	89,8
2	1300	0,81	508	125,2	75,4
2	1300	1,42	106	8,6	91,8
2	1300	1,42	229	67,6	70,5
2	1300	1,42	508	139,7	72,5
3	500	0,51	106	4,5	95,7
3	500	0,51	229	32,7	85,7
3	500	0,51	508	155,2	69,4
3	500	0,81	106	5,7	94,6
3	500	0,81	229	62,4	72,7
3	500	0,81	508	153,9	69,7
3	500	1,42	106	8,1	92,4
3	500	1,42	229	124,9	45,5
3	500	1,42	508	354,5	30,2
3	800	0,51	106	4,2	96,0
3	800	0,51	229	16,9	92,6
3	800	0,51	508	95,8	81,1
3	800	0,81	106	4,2	96,1
3	800	0,81	229	69,8	69,5
3	800	0,81	508	118,0	76,8
3	800	1,42	106	4,5	95,8
3	800	1,42	229	83,5	63,5
3	800	1,42	508	223,4	56,0
3	1300	0,51	106	2,9	97,3
3	1300	0,51	229	15,1	93,4
3	1300	0,51	508	65,0	87,2
3	1300	0,81	106	3,3	96,9
3	1300	0,81	229	25,1	89,0
3	1300	0,81	508	140,2	72,4
3	1300	1,42	106	5,1	95,2
3	1300	1,42	229	74,2	67,6
3	1300	1,42	508	146,5	71,2