



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Programa Interunidades



Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

THAÍS DE ALMEIDA

**ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS
APLICADA A AVALIAÇÃO DE ATRIBUTOS
DE AGREGADOS NA SEPARAÇÃO SÓLIDO
LÍQUIDO**

Rio Claro – SP

2020

THAÍS DE ALMEIDA

ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS APLICADA A AVALIAÇÃO DE ATRIBUTOS DE AGREGADOS NA SEPARAÇÃO SÓLIDO LÍQUIDO

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Área de Concentração Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi

Rio Claro – SP
2020



A447a Almeida, Thais de
Análise de componentes principais aplicada a avaliação de atributos de agregados na separação sólido líquido / Thais de Almeida. -- Bauru, 2020
106 p. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru
Orientador: Rodrigo Braga Moruzzi

1. agregados de fractal. 2. sedimentação. 3. FAD. 4. análise de imagem. 5. componentes principais. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE THAÍS DE ALMEIDA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 03 dias do mês de fevereiro do ano de 2020, às 14:00 horas, no(a) Sala de Reuniões do DEPLAN - IGCE - Unesp / Rio Claro, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. RODRIGO BRAGA MORUZZI - Orientador(a) do(a) Departamento de Planejamento Territorial e Geoprocessamento - DEPLAN / Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) de Rio Claro – UNESP, Profª. Drª. LIANE YURI KONDO NAKADA do(a) Área de Meio Ambiente / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, Prof. Dr. ANDRE LUIZ DE OLIVEIRA do(a) Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de Uberlândia, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de THAÍS DE ALMEIDA, intitulada **AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS ATRIBUTOS DE AGREGADOS NA SEPARAÇÃO POR SEDIMENTAÇÃO E FAD**. Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: Aprovada. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. RODRIGO BRAGA MORUZZI

Profª. Drª. LIANE YURI KONDO NAKADA

Prof. Dr. ANDRE LUIZ DE OLIVEIRA

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

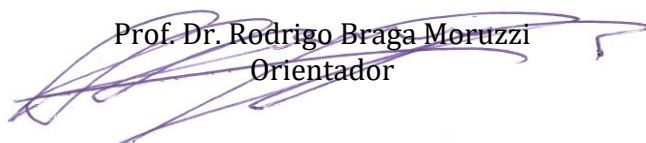
A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO ALUNO:
THAIS DE ALMEIDA

DE: "AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS ATRIBUTOS DE AGRAGADOS NA SEPARAÇÃO POR
SEDIMENTAÇÃO E FAD"

PARA: "ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS APLICADA A AVALIAÇÃO DE ATRIBUTOS DE
AGREGADOS NA SEPARAÇÃO SÓLIDO LÍQUIDO"

Bauru, 03 de fevereiro de 2020.

Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi
Orientador



DEDICATÓRIA

Para meus pais Marco Aurélio de Almeida,
Célia Aparecida Costa de Almeida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Marco Aurélio de Almeida, Célia Aparecida Costa de Almeida e aos meus padrinhos José Antônio de Oliveira e Marlene Marcondes de Oliveira por todo o apoio e carinho, durante esses dois anos de mestrado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi pela orientação, paciência, atenção e todo o ensinamento compartilhado.

A todos os professores do mestrado que contribuíram para a minha formação acadêmica.

A todos que trabalham no Deplan, especialmente a técnica de laboratório Carol, que me acompanhou e auxiliou durante a rotina laboratorial.

As minhas amigas Paula Parmigiani Antunes e Juliana Gomes que estiveram presentes durante essa e todas as etapas da minha vida.

Aos membros da banca pela disposição e conselhos para o aperfeiçoamento do presente trabalho.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado - Código de Financiamento 001.

RESUMO

Água de qualidade, livre de poluentes e patógenos é um recurso humano necessário e valioso. As contaminações por fontes naturais e antrópicas podem ameaçar a qualidade desses cursos d'água, fazendo-se necessário um tratamento prévio antes de ser disponibilizada para abastecimento público.

Com objetivo de eliminação de contaminantes e impurezas diversos processos e operações de tratamento físico/químico são utilizados, como a coagulação, a floculação, e processos de separação sólido/líquido.

Para a avaliação do padrão de qualidade final da água pós tratamento são necessários índices de monitoramento, que podem ser obtidos através métodos diretos e/ou indiretos.

Os métodos diretos de características físicas e morfológicas tem ganhado cada vez mais atenção entre os estudos da área. Seus parâmetros, como tamanho das partículas e estrutura de fractal têm sido um novo recurso para a temática floculação.

Buscando maior entendimento sobre os principais fatores que contribuem para a separação dos agregados de fractal, e conseqüentemente melhor eficiência de remoção, o presente estudo teve como objetivo investigar o desempenho da Sedimentação Gravitacional e da Flotação por Ar Dissolvido, e suas relações com as características físicas das partículas floculentas a partir da análise das principais variáveis que interferiram nos processos.

Para tal, foram investigadas em escala de laboratório quatro diferentes águas preparadas com ácido húmico, caulinita e coaguladas com Sulfato de Alumínio e Cloreto Férrico.

O processo de floculação foi monitorado por análise de imagem digital visando obter variáveis que auxiliam a determinação das características físicas da partícula como, a Distribuição do Tamanho de Partículas (DTP), e seu parâmetro representativo β , bem como a morfologia de fractal dos flocos. Os resultados foram avaliados por meio de Análise de Componentes Principais (ACP), que permite verificar quais as variáveis que mais interferiram nos processos de separação estudados.

Sendo assim, o presente estudo teve como objetivo investigar os principais fatores que contribuem para a separação dos agregados nos processos de Sedimentação

Gravitacional e Flotação por Ar Dissolvido a partir da análise das características físicas das partículas floculentas.

Palavras-Chave: agregados de fractal, sedimentação, FAD, análise de imagem, análise de componentes principais.

ABSTRACT

Quality water, without pollutants and pathogens is a necessary and valuable human resource. Contamination of natural and anthropogenic sources can affect the quality of these watercourses, requiring primary treatment before being available for public supply.

In order to eliminate contaminants and impurities several processes and physical/chemical treatment operations such as, coagulation, flocculation, and solid/liquid separation are used.

For the evaluation of the final quality of the water, monitoring indices are necessary, which can be obtained through direct or indirect methods. The direct methods of physical and morphological characteristics have increased attention in this area studies. Parameters such as particle size and fractal structure has been a new feature for flocculation thematic.

The aim of this study was investigate the performance of Gravitational Sedimentation and Dissolved Air Flotation and their relationship to the particle's physical characteristics particles from the analysis of the main variables that interfered in the processes.

For this purpose, four different types of water prepared with humic acid, kaolin solution and coagulated with Aluminum Sulphate and Ferric Chloride were investigated in laboratory scale.

The flocculation process was monitored by digital image analysis in order to obtain variables that help to determine the particle's physical characteristics such as the Particle Size Distribution (DTP) and its representative β parameter as well as the flocs fractal morphology. The results were evaluated through Principal Component Analysis (PCA), which allows verify which variables interfered the most in the separation process studied.

Therefore, the objective of this study was to investigate the main factors that contribute to the separation of the aggregates in the sedimentation and flotation processes by dissolved air from the analysis of the physical characteristics of the flocculent particles.

Key-words: fractal aggregates, sedimentation, FAD, image analysis, principal component analysis.

Graphical Abstract

O *graphical abstract* a seguir (Figura 1) resume a ideia principal do trabalho. Neste está descrito o processo de rotina de laboratório com equipamentos de bancada, coagulação, floculação e processos de separação de Sedimentação e FAD, coleta de amostras para cada respectivo processo de separação, análise das amostras, captura de imagens e processamento dos resultados obtidos.

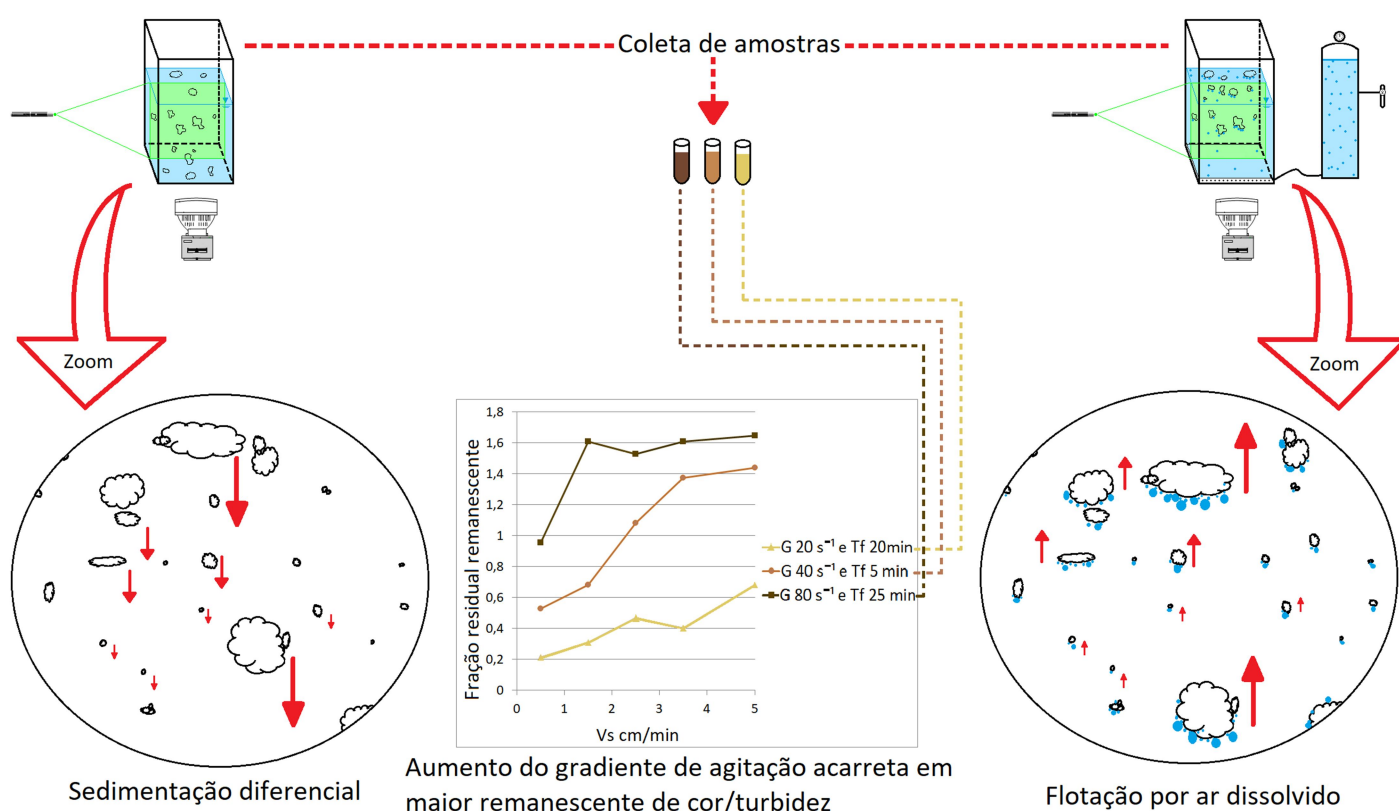


Figura 1. *Graphical abstract*. Resume os principais processos realizados durante a pesquisa.

Podemos observar na ilustração que o jarro localizado a esquerda representa os experimentos por processo de Sedimentação. O círculo possibilita melhor compreensão através da ampliação dos detalhes, é possível perceber as forças atuantes sobre os flocos de diferentes tamanhos, já que flocos de maior tamanho e densidade tendem a possuir maior velocidade descensional. Já o jarro a direita é possível observar a representação do processo de FAD. O zoom permite observar que os flocos maiores e menos compactos (estruturas mais soltas) permitem mais e

melhores fixações de bolhas de ar, o que conseqüentemente gera maior velocidade ascensional de flocos com essas características.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACP: Análise de Componentes Principais.

CP: Componentes Principais.

DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio.

dmédia: Média dos Diâmetros dos Flocos.

dmediana: Mediana dos Diâmetros dos Flocos.

DTMB: Determinação de Tamanho de Microbolhas de Ar.

DTP: Distribuição de Tamanho de Partículas.

ETA: Estação de Tratamento de Água.

ETE: Estação de Tratamento de Esgoto.

FAD: Flotação por Ar Dissolvido.

LALLS: *Low-angle laser light scattering*.

OD: Oxigênio Dissolvido.

PCC 2.2: Aplicativo *Phantom Câmera Control version 2.2*.

UNESP: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

LISTA DE SÍMBOLOS

α : Constante de Proporcionalidade Alfa da Equação 1.

A: Soma das Áreas de todas as Partículas Primárias Contidas dentro da Dimensão L.

A_o : Coeficiente Relacionado a Concentração Total de Partículas.

Al^{3+} : Sal Metálico de Alumínio (“Alumínio Solúvel”).

$Al_2(SO_4)_3$: Sulfato de Alumínio.

$Al_2(SO_4)_3 \cdot 16H_2O$: Sulfato de Alumínio Hidratado.

β : Parâmetro Beta, Coeficiente que Caracteriza a Distribuição de Tamanho da Partícula.

cm: Centímetros.

cm/min: Centímetros por minuto.

d: Diâmetro do floco.

Df: Dimensão de Fractal.

Dn: Número de Partículas por Unidade de Volume do Fluido na Faixa Correspondente.

d_p : Diâmetro da Partícula.

$\pm$: Com variação de Mais ou Menos.

Fe^{3+} : Sal metálico de Ferro.

$FeCl_3$: Cloreto Férrico.

fps: fotos por Segundo.

Frr: Fração Residual Remanescente.

Gf: Gradiente de Floclulação.

g/L: grama por litro.

G_{mr} : Gradiente Médio de Velocidade de Mistura Rápida.

h: Horas.

Hz: Hertz.

k: Constante de Ajuste da Equação 5.

L: Dimensão de Tamanho do Floco.

ln: Logarítmo Natural.

min: minutos.

mm: milímetros.

mW: Megawatt.

NaOH: Hidróxido de Sódio.

n° (dp): Função de Distribuição de Tamanho de Partículas.

nm: Nanômetro.

pH: potencial Hidrogeniônico.

%: Porcentagem.

r: Coeficiente de correlação de Pearson.

rpm: Rotações por Minuto.

R1: Residual Remanescente de Cor ou Turbidez na Velocidade 1 de Sedimentação (5,0 cm/min) ou FAD (28,0 cm/min).

R2: Residual Remanescente de Cor ou Turbidez na Velocidade 2 de Sedimentação (3,5 cm/min) ou FAD (14,0 cm/min).

R3: Residual Remanescente de Cor ou Turbidez na Velocidade 3 de Sedimentação (2,5 cm/min) ou FAD (9,3 cm/min).

R4: Residual Remanescente de Cor ou Turbidez na Velocidade 4 de Sedimentação (1,5 cm/min) ou FAD (7,0 cm/min).

R5: Residual Remanescente de Cor ou Turbidez na Velocidade 5 de Sedimentação (0,5 cm/min) ou FAD (4,6 cm/min).

®: Marca Registrada.

S: Assimetria.

S⁻¹: 1/Segundo.

Σ: Somatória.

tf: Tempo de Flocculação.

uC: Unidade de Cor.

μm: Micrômetro.

μs: Microsiemens.

uT: Unidade de Turbidez.

Vf: Velocidade de Flocculação.

Vs: Velocidade de Sedimentação.

$\bar{X}$: Média Aritmética para a Variável X.

$\bar{Y}$: Média Aritmética para a Variável Y.

SUMÁRIO

RESUMO.....	4
ABSTRACT.....	8
LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS.....	10
LISTA DE SÍMBOLOS.....	11
SUMÁRIO.....	13
1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	16
2 OBJETIVOS.....	19
2.1 Geral.....	19
2.2 Específicos.....	19
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3.1 Tratamento de água para abastecimento público.....	20
3.1.1 Coagulação.....	21
3.1.2 Floculação.....	22
3.1.1 Sedimentação Gravitacional.....	23
3.1.1 Flotação por Ar Dissolvido.....	23
3.2 Parâmetros de monitoramento.....	24
3.2.1 Distribuição do Tamanho de Partícula (DTP).....	25
3.2.2 Dimensão de Fractal (D_f).....	26
3.2.3 Parâmetro β	28
3.2.4 Monitoramento dos agregados formados durante a floculação.....	29
3.3 Análise de Componentes Principais (ACP).....	29
3.3.1 Conceito da Análise de Componentes Principais (ACP).....	29

3.3.2 Definições das estatísticas que compõem a Análise de Componentes Principais (ACP).....	30
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	32
4.1 Fluxograma dos processos propostos.....	32
4.2 Águas de estudo.....	32
4.2.1 Parâmetros de qualidade das águas de estudo.....	33
4.2.2 Preparação das águas de estudo.....	35
4.3 Ensaios de Floculação.....	36
4.4 Monitoramento dos agregados formados durante a floculação.....	37
4.5 Ensaios de sedimentação.....	41
4.6 Ensaios de flotação.....	42
4.7 Fração Residual Remanescente.....	43
4.8 Determinação de Parâmetros de interesse.....	44
4.8.1 Dimensão de Fractal.....	44
4.8.2 Distribuição do Tamanho de Partículas (DTP).....	46
4.8.3 Parâmetro representativo da função contínua de distribuição de tamanho (β).....	46
4.9 Eficiência dos processos de sedimentação e FAD.....	47
4.10 Análise de Componentes Principais (ACP) integrada ao trabalho.....	48
4.10.1 Correlação.....	48
4.10.2 ACP.....	48
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
5.1 Resultados Fração Residual Remanescente (<i>Frr</i>).....	51
5.2 Sedimentação para água preparada com ácido húmico e coagulada com Sulfato de Alumínio (Condição de Análise 1).....	52
5.2.1 Correlação.....	53
5.2.2 Componentes Principais.....	54

5.3	Sedimentação para água preparada com caulinita e coagulada com Cloreto Férrico (Condição de Análise 2)	62
5.3.1	Correlação	62
5.3.2	Componentes Principais	63
5.4	Flotação para água prepara com ácido húmico e coagulada com Sulfato de Alumínio (Condição de Análise 3)	68
5.4.1	Correlação	68
5.5	Flotação para água preparada com caulinita e coagulada com Sulfato de Alumínio (Condição de Análise 4)	68
5.5.1	Correlação	68
5.6	Sedimentação para água preparada com ácido húmico e coagulada com Cloreto Férrico (Condição de Análise 5)	
5.6.1	Correlação	68
5.6.2	Componentes Principais	69
5.7	Sedimentação para água preparada com caulinita e coagulada com Cloreto Férrico (Condição de Análise 6)	74
5.7.1	Correlação	74
5.7.2	Componentes Principais	75
5.8	Flotação para água preparada com ácido húmico e coagulada com Cloreto Férrico (Condição de Análise 7)	80
5.8.1	Correlação	80
5.8.2	Componentes Principais	80
5.9	Flotação para água preparada com caulinita e coagulada com Cloreto Férrico (Condição de Análise 8)	85
5.9.1	Correlação	85
5.9.2	Componentes Principais	86
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
7	CONCLUSÃO	92
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Com o crescimento populacional, o consumo de água tem ampliado, aumentando também o uso exacerbado e inconsciente desse bem. Essa demanda crescente tem sido ainda maior em razão das grandes quantidades de recursos hídricos poluídos, seja por ações antrópicas (diretas e ou indiretas), seja por causas naturais.

A poluição hídrica compromete a qualidade da água, prejudicando a biodiversidade de ecossistemas, bem como o abastecimento de água e a produção de alimentos, além disso, água de qualidade é essencial não só à sedentação humana e animal, mas também a processos industriais, necessidades urbanas e rurais.

Visando a disponibilização para o consumo humano, que é prioridade dentre as destinações de abastecimento, a água deverá atender alguns critérios básicos para evitar as chances de transmissão de doenças relacionadas a microrganismos patógenos, os quais podem estar associados a impurezas presentes. Nesse contexto, se faz essencial as Estações de Tratamento de Água (ETA), pois garantem água de qualidade, atendendo as exigências. Essas ETA realizam o tratamento da água e a disponibilizam em condições adequadas para o abastecimento público.

Para o tratamento é necessária remoção das partículas que causam alteração da qualidade da água. A remoção dessas é, normalmente, feita pela coagulação, processo de tratamento que consiste na desestabilização química de impurezas resultante da alteração de características da água. (DI BERNARDO e DANTAS, 2005). Após esse processo, é realizada a floculação, que promove o transporte e o choque das partículas desestabilizadas na etapa anterior, transformando as partículas discretas e de pequenas dimensões em agregados maiores, conhecidos como flocos (BALTAR e OLIVEIRA, 1998; HOGG, 2000).

Após essas etapas, pode ser realizada a sedimentação, a Flotação por Ar Dissolvido, ou outro processo¹ com a finalidade de remoção dos flocos formados.

¹ Existem diversos processos e operações que podem ser utilizados para tratamento da água, a eficiência ou comparação desses processos não são objetivo desse trabalho, e sim como as principais características físicas podem influenciar na eficiência de separação de dois processos, a Sedimentação Gravitacional e a Flotação por Ar Dissolvido.

Há inúmeros processos de separação sólido/líquido que podem ser utilizados em uma ETA, os mais comumente utilizados são a Sedimentação Gravitacional e a Flotação por Ar Dissolvido.

A sedimentação é uma operação física em que se utiliza a gravidade com o propósito de assentar os sólidos suspensos na água. Nesta, os flocos formados na floculação são submetidos a um tempo de sedimentação estipulado, fazendo com que as impurezas se concentrem no fundo, por esse motivo para ocorrer da maneira prevista é necessário que o fluido não seja exposto a grandes perturbações de movimento.

Esse processo possui baixo valor empregado se comparado aos outros, pois se utiliza da força gravitacional para assentamento das impurezas.

O sistema FAD separa as partículas ou agregados formados no processo de floculação da água por meio da introdução de bolhas de ar, essas bolhas se aderem ao interior dos flocos ou à sua camada externa. O ar adicionado torna a densidade relativa das partículas menor do que o meio aquoso em que estão inseridas, proporcionando arraste hidráulico ascensional e concentrando o conjunto floco/bolha na superfície para posterior remoção.

Para verificar a eficiência desses processos há vários índices de monitoramento que normalmente são medidos por parâmetros indiretos (como DBO, OD, etc.), entretanto, métodos diretos também podem ser grandes aliados. Alguns métodos diretos, como a Distribuição do Tamanho de Partículas (DTP), Dimensão de Fractal (Df) e outros apresentam informações sobre a morfologia dos flocos formados. Essas informações podem ser úteis na busca pelo propósito de aumentar a eficiência de remoção das impurezas.

Estudos estão sendo feitos para entender quais as melhores condições desses parâmetros e como estes associados entre si podem resultar em características morfológicas e físicas requeridas para obtenção de eficiência máxima de remoção.

Os gradientes de agitação do sistema, tipo de coagulante, tempo de floculação influenciam na formação e estrutura dos flocos formados. Monitorar essas condições é fundamental para estudar qual a influência das características físicas nos processos de separação.

O tamanho dos agregados formados é indispensável para eficácia do sistema, e é normalmente medido pelo parâmetro Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP). Esse estabelece como é a distribuição de tamanho dos flocos e partículas presentes na amostra em determinada condição de gradiente de velocidade média de agitação (Gf) e tempo de floculação (tf). A DTP é relevante para determinar como é a relação de eficiência de remoção no processo de Sedimentação Gravitacional, o qual se utiliza da força gravitacional para sedimentação dos flocos, para isso é ideal flocos grandes e de alta massa específica.

Para o processo de Flotação por Ar Dissolvido (FAD), a condição ideal de DTP são flocos grandes, porém menores do que o processo de Sedimentação exige, e de menor massa específica, facilitando a agregação das bolhas de ar ao floco e permitindo maior arraste ascensional desse conjunto.

No entanto, segundo Moruzzi et al., 2017 e Vahedi e Gorczyca, 2012, agregados com o mesmo tamanho podem ter diferentes estruturas devido a conformação dos diferentes arranjos de partículas primárias dentro dos agregados durante o processo floculação. Por esse motivo outra característica determinante é a morfologia, a qual se pode utilizar o conceito de Dimensão de Fractal (Df) para avaliar e quantificar a estrutura morfológica dos flocos formados.

A Dimensão de Fractal explica através de valores qual a forma aproximada do agregado, permitindo estudar quais as características morfológicas ideais dos flocos para cada processo de remoção.

É sabido que o par de valores dados pela velocidade de gradiente médio e pelo tempo de floculação determina o tamanho da distribuição e a forma dos agregados. Isso significa que cada condição de agitação/tempo de floculação gera uma diferente conformação de tamanho, densidade e estrutura morfológica de floco, possibilitando analisar quais conjuntos de características físicas são ideais para obter maior eficiência de remoção para cada processo de separação sólido/liquido.

Objetivando essa linha de raciocínio o presente trabalho buscou entender melhor a relação das características físicas com a eficiência de remoção.

O conjunto das características físicas forma um tipo de floco específico, de certo tamanho, densidade, forma, estrutura. Ou seja, há uma relação de dependência entre as características. Essa relação pode ser diretamente proporcional ou inversamente proporcional, condições que podem ser analisadas

através de ferramentas estatísticas, as quais possibilitam verificar qual a relação entre os parâmetros de monitoramento e entender como estes, e consequentemente as características físicas, influenciam nos processos de separação.

Um método estatístico que tem sido utilizado é a Análise de Componentes Principais. Esta ferramenta promove a redução de um conjunto de dados provenientes de uma amostra, a um conjunto de dados menor, sendo esses, os principais representativos da amostra original, facilitando assim o estudo dos resultados.

Essa técnica permite também verificar a influencia das variáveis analisadas na amostra estudada através da correlação. Com essa principal intenção, a ACP foi aplicada ao estudo, buscando entender melhor a relação entre os parâmetros estudados e os processos de separação.

Em síntese, este estudo tendo como ponto de partida que os processos de remoção de partículas podem ser aprimorados a partir do melhor entendimento entre as características físicas dos agregados, condições de floculação e coagulação, investigou os principais fatores morfológicos que podem gerar maior eficiência nos processos de Sedimentação Gravitacional e Flotação por Ar Dissolvido, a partir da ferramenta estatística de Análise de Componentes Principais.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar a influência dos atributos de agregados na separação através dos processos de Sedimentação Gravitacional e Flotação Por Ar Dissolvido, objetivando máxima remoção de impurezas da água de abastecimento.

2.2 Específicos

- Avaliar o desempenho da sedimentação e da Flotação por Ar Dissolvido por meio da construção de curvas que relacionam Fração

Residual Remanescente com Velocidades de Sedimentação e Velocidades de Flotação, respectivamente para cada processo.

- Avaliar por meio a Análise de Componentes Principais os fatores que mais interferem nas condições morfológicas e estruturais dos agregados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Tratamento da água para abastecimento público

Com a industrialização, intensificação da urbanização, crescimento populacional e grande aumento da poluição ambiental, os corpos d'água sofreram drásticas alterações, como linearização de seus leitos, soterramento, transposições e barragens, além de servirem como receptores e diluidores de dejetos industriais e domésticos. Chowdhury e El-Shorbagy (2013) apontam que a demanda atual sobre os recursos hídricos é tão grande que está refletindo em uma “crise da água” devido à baixa disponibilidade de água potável. Como consequência, é cada vez mais difícil encontrar uma fonte natural de água de qualidade para as necessidades humanas e animais, já que as águas contaminadas são a principal causa de doenças transmitidas pela veiculação hídrica e ameaça à saúde pública (GURPREET, S. M., KALSHIK, C. S. K, e MUKHERJI, A. C. S., 2017).

Essas circunstâncias exigiram um tratamento, um processamento para obter água de qualidade que atenda objetivos e/ou padrões específico do consumidor final ou de agências reguladoras (JOHN C. C., et al., 2012).

Nesse contexto surgiram as Estações de Tratamento de Água de Abastecimento (ETA), que tratam a água dos corpos hídricos antes de disponibilizá-la para o abastecimento público, visando diminuir as possibilidades de veiculação de doenças relacionadas à contaminação da mesma.

Em uma ETA são utilizados processos e operações de tratamento para obter o padrão de qualidade da água final.

Normalmente, as etapas de tratamento consistem em:

- Pré-cloração para facilitar a retirada de matéria orgânica;
- Pré-alkalinização para ajuste do pH necessário a próxima etapa;
- Coagulação para desestabilizar eletricamente as partículas indesejadas, facilitando a agregação;
- Floculação a fim de provocar a formação de flocos a partir das partículas desestabilizadas na etapa anterior; [processo de separação sólido/líquido para separação e remoção da parte sólida formada;]
- Decantação com assentamento dos flocos a partir da força gravitacional;
- Filtração para remoção de partículas que possam ter restado;
- Pós-alkalinização para correção final do pH;
- Desinfecção com o objetivo de garantir que a água fornecida chegue isenta de bactérias e vírus até o consumidor final, e por último;
- Fluoretação para ajudar a prevenir cáries.

As etapas de coagulação, floculação e dois tipos de processo de separação sólido/líquido serão melhores abordadas abaixo, pois são parte integrante da presente pesquisa.

3.1.1 Coagulação

De acordo com Di Bernardo e Dantas (2005), coagulação é uma etapa do tratamento de água na qual, através de um mecanismo a água bruta é coagulada (grande parte das vezes com um sal metálico) formando precipitados do metal utilizado como coagulante com consequente aprisionamento das impurezas.

A maioria das impurezas presentes na água possuem carga negativa repelindo uma as outras, o processo de coagulação reduz o potencial elétrico existente entre a camada externa da partícula e o meio aquoso em que está inserida, possibilitando posterior aglomeração e remoção.

Os fatores determinantes para o sucesso da coagulação são a dosagem e o tipo de coagulante escolhido, o pH do meio, a concentração de impurezas, e a intensidade de mistura que o coagulante é inserido no meio, visando proporcionar

máximo contato entre o agente coagulante e as partículas de impurezas (AMIRTHARAJAH e O'MELIA, 1990; DENTEL, 1991).

Outra condição que pode alterar a eficiência de coagulação/floculação são os mecanismos de coagulação, pois cada um desestabiliza as partículas de uma forma diferente, produzindo estruturas de flocos diferentes.

Existem diversos mecanismos de coagulação, todos possuem a função de minimizar ou até eliminar a força de repulsão das impurezas presentes no meio. Os mecanismos mais conhecidos são a adsorção e neutralização de carga, adsorção e formação de pontes, compressão da dupla camada elétrica e varredura. Segundo O' Melia (1972), os fatores que determinam a coagulação ocorrem predominantemente por um mecanismo são as características físicas da água bruta, concentração de impurezas, dosagem e pH do coagulante.

As características do floco ideal para o favorecimento da FAD pode ser obtido pelo mecanismo de varredura, que consiste na formação de flocos maiores e de estrutura aberta, ou seja, flocos de maior tamanho e estrutura, e menor densidade. Essas características morfológicas/estruturais favorecem a formação de aglomerados floco-bolha, resultando em maior eficiência de remoção através do processo de flotação.

3.1.2 Floculação

Segundo Ching, Tanaka e Elimelech (1994) para otimizar o processo são necessários flocos de um certo tamanho, força e densidade, por isso, após a coagulação é realizada a floculação, que promove o transporte e o choque das partículas desestabilizadas na etapa anterior, transformando as partículas discretas e de pequenas dimensões em agregados maiores (LI et al., 2006).

A floculação é um processo que ocorre sob gradiente médio de velocidade para gerar colisões entre as partículas possibilitando a formação de flocos, ela depende da eficácia da coagulação, da concentração de partículas, da velocidade de agitação e do tempo de floculação (tempo que sistema fica submetido à agitação).

Segundo Voltan (2007) as forças que atuam na floculação permitem a formação de flocos, entretanto o choque pode promover a quebra dos mesmos, ou

seja, a agitação do sistema gera agregação e ruptura simultaneamente, influenciando o tamanho e estabilização da condição dos flocos.

O aumento do tempo de floculação exerce influência direta na redução da eficiência de floculação (VOLTAN, 2007; CONSTANTINO, 2008). Isso, pois após os flocos atingirem seu tamanho máximo e entrarem na fase de estabilização, o mecanismo de ruptura prevalece ao de formação de novos agregados, reduzindo o tamanho dos flocos já formados e conseqüentemente, a eficiência.

Uma vez encontradas as condições ideais de floculação, os flocos são removidos por processo de separação sólido/líquido, que pode ser através da sedimentação gravitacional, variados tipos de filtração, e flotação por ar dissolvido.

3.1.3 Sedimentação Gravitacional

O processo de Sedimentação Gravitacional é economicamente vantajoso e possui grande eficiência, tornando-o um dos mais utilizados no Brasil.

A sedimentação se utiliza da força gravitacional com propósito de assentamento dos agregados, para isso são requeridas algumas características físicas visando a efetividade do processo.

As características necessárias para alta eficiência em Sedimentação são flocos grandes, rígidos e de alta densidade.

Flocos com tamanhos e características diferentes, segundo Han et al. (2006), podem ter a mesma capacidade de sedimentação. Isto ocorre porque a sedimentação não depende só do tamanho dos flocos, mas também da densidade e da força de ligação, dentre outros fatores, razão pela qual é necessário entender e estudar quais são as características físicas que, associadas entre si, resultam em diferentes cenários estruturais ideais de agregado, visando alcançar máxima eficácia de remoção por Sedimentação.

3.1.4 Flotação por Ar Dissolvido

A Flotação por Ar Dissolvido (FAD) é um processo de alta eficiência, baixo tempo de operação e necessita de menor área de projeto, tornando-a uma opção interessante. A FAD é particularmente eficaz no tratamento de água de

abastecimento, pois remove com maior eficiência que a Sedimentação Gravitacional, águas que contêm altas concentrações de algas, cor natural ou matéria orgânica natural (EDZWALD, 2010).

Apesar de ser utilizada há várias décadas, ainda é necessário um estudo mais aprofundado acerca de parâmetros que poderiam melhorar sua eficiência no tratamento de água, entretanto é de senso comum que o tamanho dos agregados e das microbolhas do sistema são fundamentais para aumentar sua efetividade (EDZWALD, 1995).

Os agregados de partículas de matéria orgânica, partículas que causam cor e turbidez formados nos processos de separação, podem ser estudados através de um conceito denominado agregados de fractal, um fractal é um objeto que apresenta invariância na sua forma à medida que a escala é alterada, mantendo-se a sua estrutura idêntica à original (ASSIS, et al., 2008).

Segundo Junior (2013) as melhores condições físicas e morfológicas para agregados são flocos grandes e de menor densidade, facilitando a agregação das micro bolhas de ar aos flocos formados.

Esse e outros estudos da área corroboram para entender como os aspectos das características físicas se relacionam entre si, influenciam e resultam na conformação ideal do floco para obtenção de máxima eficiência da FAD.

3.2 Parâmetros de monitoramento

A eficiência do sistema em geral pode ser conseguida através do uso de ferramentas como o monitoramento, que é a detecção de parâmetros que permitem a interpretação contínua da situação atual através de testes experimentais, possibilitando assim medir o desempenho real do sistema (COLLIVIGNARELLI et al., 2017).

Para avaliar a eficiência desses processos de remoção são utilizados métodos de análises, e é cada vez mais difundido que os métodos diretos de análise das características das águas e dos flocos fornecem importantes informações para o tratamento de águas de abastecimento. Segundo Santos et al. (2004) a análise de tamanho de partículas pode auxiliar na decisão e na melhoria de tecnologias de tratamento, e na adoção de técnicas operacionais apropriadas a cada situação de

tratamento de água. O conhecimento de características dos flocos é uma ferramenta útil para o entendimento de como forças físicas atuam nos agregados em cada processo de separação sólido-líquido, e podem levar ao aprimoramento dos projetos de dimensionamento de unidades de tratamento de água.

De acordo com Oliveira et al. (2015) alguns métodos diretos, como a Distribuição do Tamanho de Partículas (DTP) e Dimensão de Fractal (Df) apresentam informações sobre a morfologia dos flocos formados, essas informações podem aumentar a eficiência de remoção das impurezas. A análise da estrutura dos agregados de partículas tem implicações claras para muitos processos importantes no tratamento de água (WAITE, 1999).

Nesse trabalho os parâmetros de interesse escolhidos para estudo foram a Distribuição do Tamanho da Partícula (DTP), o parâmetro representativo da função contínua de distribuição de tamanho (β), e a Dimensão de Fractal (Df), que auxiliaram no entendimento das feições físicas dos flocos de cada condição estudada nesse trabalho.

3.2.1 Distribuição do Tamanho de Partículas

A DTP é uma função que permite a classificação dos agregados por faixa de tamanho. Yao et al. (2015) estudaram a relação dinâmica entre a DTP e a turbidez da água e obteve como resultado que a quantidade de partícula foi proporcional à turbidez, evidenciando que essa característica é relacionada e diretamente proporcional à turbidez presente na água.

Moruzzi e Reali (2014) concluíram que a influência do tamanho do floco e o tempo de detenção hidráulica são determinantes na eficiência do sistema FAD, reforçando que é essencial mapear as melhores condições de tamanho de floco que cada processo de separação requer.

Os resultados de Gungoren et al. (2017) corroboram também para a ideia de que as medições do tamanho podem ser um método útil para determinar a força do floco e, portanto, a dosagem ótima de floculante, podendo reduzir custos com produtos químicos e aumentar a eficiência de tratamento, já que a adição de coagulante, se não bem calculada, pode onerar o processo e ocasionar maior degradação da qualidade da água do que as condições anteriores ao de tratamento.

Segundo Moruzzi e Reali (2007), a Distribuição do Tamanho de Partículas na área de saneamento pode ser obtida através de diferentes tipos de medição como as técnicas que empregam difração a laser (LALLS), da interferência de campo (bloqueio de luz) e mais recentemente, a análise de imagens.

Os mesmos autores utilizaram a análise de imagens para determinação da distribuição de tamanho de microbolhas no sistema FAD e verificaram que a análise de imagem consistiu em um método viável para a caracterização de DTP.

Atualmente tem-se empregado a análise de imagens para determinação dos aspectos morfológicos dos agregados, essa técnica tem permitido maior precisão e detalhamento do tamanho dos flocos presentes na amostra de estudo.

Moruzzi (2005), Moruzzi e Reali (2007), Moruzzi e Oliveira (2016) e Almeida (2017) utilizaram essa técnica para determinação das feições das partículas, incluindo DTP. Neste método foi feita captura de imagens e tratamento dessas através de um sistema de análise de imagens, permitindo a visualização do tamanho (diâmetro máximo, médio e mínimo) e contagem dos flocos através de imagens reais da amostra.

Prado e Campos (2009) também utilizaram essa mesma técnica para tratamento de esgoto. A análise de imagem foi empregada para determinar a distribuição granulométrica da areia presente no esgoto sanitário através do parâmetro DTP, visando aumento da eficiência de projeto de desarenadores de ETE.

Esses estudos comprovam que a análise de imagem é uma ferramenta útil e eficaz para análise das características físicas e morfológicas de partículas.

O presente estudo, a partir dessa ferramenta, analisou quais as condições físicas de agregados que interferem e geram mais eficiência de remoção nos processos de sedimentação e flotação. Essas condições físicas podem ter relações de interdependência entre si, questão que não está bem definida na literatura atual.

3.2.2 Dimensão de Fractal

Apesar da DTP fornecer importantes informações acerca do tamanho dos flocos, somente a formação de grandes agregados não é suficiente para garantir uma melhoria da velocidade de sedimentação terminal e de flotação (ascensão), já

que estas podem variar com a Dimensão Fractal (Chakraborti et al., 2000; Gregory, 1997; Johnson et al., 1996; Vahedi e Gorczyca, 2012), porosidade, e densidade dos agregados, fazendo-se necessário o estudo de outro parâmetro, a Dimensão de Fractal.

A Dimensão de Fractal (D_f) é um parâmetro que caracteriza a morfologia, estrutura dos flocos, e descreve a geometria e a variação das características físicas desses. As principais propriedades que caracterizam os fractais são a dimensão, a complexidade infinita e a auto-semelhança, esta pode ser idêntica à configuração inicial, ou anisotrópicas, ou seja, não são mantidas fixas as proporções originais em todas as direções (ASSIS et al., 2020)

A estrutura dos flocos influencia muito a eficiência dos processos de separação sólido/líquido, por esse motivo é de extrema importância conhecê-los (YU; GREGORY; CAMPOS, 2010).

Conforme Thomas et al. (1999) a abordagem microscópica baseada na caracterização do sistema através da determinação da Dimensão Fractal como função do tempo oferece a oportunidade de uma modelagem mais simples e ainda mais representativa do que as utilizadas frequentemente. Essa ideia reforça a importância das análises morfológicas dos agregados e da utilização dessas como parâmetro de projeto.

A D_f está relacionada com os gradientes de agitação durante o processo de coagulação e formação dos flocos. Moruzzi et al. (2017) verificaram que o gradiente de floculação mais baixo (20 s^{-1}) produziu uma D_f maior, constatando que as análises das velocidades de agitação influenciam na forma dos agregados formados e consequentemente na eficiência de remoção destes.

Segundo Silva (2016) o aumento de agitação através do Gradiente de floculação (G_f) provoca a diminuição no valor da Dimensão Fractal, produzindo flocos de estrutura aberta e distantes de uma esfera perfeita, que por sua vez são mais resistentes às forças de cisalhamento do que os agregados com maior valor de D_f .

Essas asserções instigam a ideia de que são necessários mais estudos direcionados a análise de como a D_f influencia nos processos de remoção e consequentemente na eficiência.

3.2.3 Parâmetro β

Outro parâmetro escolhido para análise nesse trabalho foi o β , que é utilizado para avaliar como ocorre a distribuição do tamanho de agregados pelo número total destes.

Lawler (1997) explicita que o valor em módulo de β pode variar de 1 a 4, um maior valor desse parâmetro indica maior concentração de agregados pequenos, e menor valor de β indica que a distribuição do tamanho de agregados é mais uniforme, ou seja, que na amostra há um número considerável de agregados na forma maior.

Essas considerações permitem verificar as características de tamanho de agregados na amostra, que são muito úteis quando analisados os requisitos do tamanho dos flocos para máxima eficiência de cada processo de separação sólido-líquido.

É preciso ter em mente que outros parâmetros importantes necessitam ser estudados e correlacionados, por exemplo, o tamanho das microbolhas de ar do sistema FAD, como analisado por Moruzzi e Reali (2010), que é um fator influenciado pelas forças hidrofóbicas, e essas por sua vez são dependentes do pH de coagulação como Ralston et al. (2001) enfatizam.

Além deste citado, a compactibilidade do agregado formado, a interação das forças entre partículas em relação a DTP, o tempo de detenção hidráulica e outros também são fatores importantes. Entretanto devido a grande quantidade de variáveis fica inviável analisar todas nesse estudo.

A relação entre os parâmetros de estudo pode ser feita através do desenvolvimento de modelos matemáticos. O uso de modelos matemáticos como os desenvolvidos por Lakghomi; Lawryshyn; Hofmann (2015) e por Reali (1991) são interessantes nessa linha de pesquisa, pois fornecem aproximações matemáticas para as condições reais do projeto, permitindo verificar a eficiência dos processos de remoção relacionada com o tamanho dos agregados formados.

Nessa pesquisa foi utilizada a equação obtida de Amirtharajah & O'Melia (1999), a qual será detalhada no item 4.8.3.

3.2.4 Monitoramento dos agregados formados durante a floculação

Outro ponto importante a ser destacado, é a técnica de amostragem e monitoramento que foram utilizados nesse trabalho. Baseado Oliveira et al., (2015), Chakraborti et al. (2003) e Gregory e Chung (1995), esse estudo utilizou técnicas não intrusivas de monitoramento e captura de imagens dos flocos por meio de uma câmera de alta resolução.

Através do monitoramento por imagem dos parâmetros mencionados foram analisados nesse estudo dois processos de remoção com quatro tipos de águas de estudo (preparadas com Caulinita, com Ácido Húmico e coaguladas com Sulfato de Alumínio e Cloreto Férrico, independentemente/separadamente) com a intenção de verificar quais parâmetros mais influenciam na eficiência dos processos de separação.

Essa tese buscou aumentar o entendimento acerca do assunto e melhorar a eficiência no tratamento das águas de abastecimento por meio de estudos dos aspectos da morfologia da partícula, na remoção dos flocos por flotação de ar dissolvido e por sedimentação gravitacional.

3.3 Análise de Componentes Principais (ACP)

3.3.1 Conceito e Fundamentos da Análise de Componentes Principais (ACP)

A Análise de Componentes Principais (ACP) foi inicialmente descrita por Karl Pearson em 1901, e consolidada por Hottelling em 1933/1936 com a finalidade de usa-la para estudo das estruturas de correlação. Entretanto essa técnica analítica somente ganhou notoriedade após 1980 com o desenvolvimento da microinformática.

Com o avanço da estatística, essa técnica foi usada para variados tipos de análise, principalmente para explicar resultados de uma amostra com menor número de variáveis representativas. Ou seja, a ACP é uma técnica estatística que analisa e modifica o conjunto inicial de variáveis correlacionadas através de uma

transformação linear com o objetivo de reduzir os dados, transformando-os em um segundo conjunto menor que o inicial, porém sem perder as características e informações principais do conjunto original.

A ACP pode ser utilizada não só para reduzir a massa expressiva de dados em um conjunto menor, mas também para agrupar os indivíduos (dados) pelas similaridades. Essa técnica permite o agrupamento de indivíduos similares através de exames visuais e interpretação geométrica por meio da análise de dispersões gráficas (gráfico de escores, ou *scores*) dos dados no espaço bi ou tridimensional. (VICINI, 2005), ou seja, essa análise permite agrupar os indivíduos de acordo com sua variação, nessa os dados são agrupados segundo suas variâncias, segundo seu comportamento dentro da população (amostra), representado pela variação do conjunto de características que define o indivíduo.

A ACP é uma análise da estatística multivariada que se utiliza da transformação linear para converter um conjunto de variáveis originais em outro conjunto de variáveis não correlacionadas de mesma dimensão, essas variáveis são chamadas de Componentes Principais (CP), ou seja, representam as principais características da amostra inicial. Os componentes principais são independentes entre si e retêm em ordem decrescente o máximo de informação de variação total dos dados originais (JOHNSON; WICHERN, 1998; HONGYU, 2015).

A análise de Componentes Principais foi utilizada nesse projeto com o intuito de analisar como os parâmetros em conjunto (associados) responsáveis pelas características físicas interferem nos processos de remoção.

3.3.2 Definições das estatísticas que compõem a Análise de Componentes Principais (ACP)

- **Autovalor**

Os autovalores são as variâncias dos componentes principais. O critério de Kaiser utiliza o autovalor para determinar o número de componentes principais, nesse critério são considerados Componentes Principais somente os autovalores maiores que 1.

- **Proporção**

É a proporção/porcentagem da variabilidade dos dados que cada componente principal explica. Ela determina quais componentes principais explicam a maioria da variabilidade nos dados, ou seja, quanto maior a proporção, maior a variabilidade que o componente principal explica.

- **Acumulado**

Acumulado é a proporção acumulada da variabilidade amostral explicada pelos componentes principais consecutivos. Ele avalia a quantidade total de variância que os componentes principais consecutivos explicam, normalmente usado para determinar o número de componentes principais a ser usado, restando os componentes principais que explicam um nível aceitável de variância de acordo com a intenção do pesquisador.

- **Componentes Principais (CP)**

São combinações lineares das variáveis originais que representam a variação dos dados (autovetores). São obtidas em ordem de importância, ou seja, as primeiras combinações sempre explicam uma proporção maior da variação presente nos dados do que as combinações seguintes.

- **Escore (Scores)**

São combinações lineares dos dados que são determinados pelos coeficientes para cada componente principal. Para obter o escore de uma amostra é necessário substituir seus valores na equação linear pelo componente principal, ou seja, multiplicar os valores da matriz original dos dados, pelos Componentes Principais.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Fluxograma dos processos propostos

Na Figura 2 apresenta-se um fluxograma geral dos ensaios realizados em laboratório. Foram investigadas diferentes dosagens de coagulantes e valores de pH para obtenção da dosagem ótima.

O mecanismo de coagulação utilizado nesse trabalho foi o de varredura, que consiste em adicionar ao meio uma dosagem de coagulante que ultrapasse o seu limite de solubilidade, gerando precipitados de metal contendo as partículas a serem removidas. A varredura foi escolhida para este estudo, pois permite a formação de flocos maiores, condição que é requerida para os processos de Sedimentação e FAD.

Para a análise foram preparados quatro tipos de água de estudo as quais foram coaguladas, agitadas em diferentes valores de gradiente médio de floculação (G_f), submetidas a diferentes tempos de floculação (tf) e, obtidos registros fotográficos, a partir dos quais foi possível determinar Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP) e de Dimensão de Fractal (Df).

As condições definidas nas etapas anteriores foram aplicadas para os dois processos de separação sólido/líquido, Sedimentação e Flotação por Ar Dissolvido, dos quais foram coletadas amostras em diferentes velocidades de sedimentação (V_s) e velocidades de flotação (V_f).

O desempenho dos processos de separação foi avaliado por meio da construção das curvas de Sedimentação e de Flotação, que relacionam fração residual remanescente (Frr) com as respectivas velocidades de sedimentação (V_s) e velocidades de flotação (V_f).

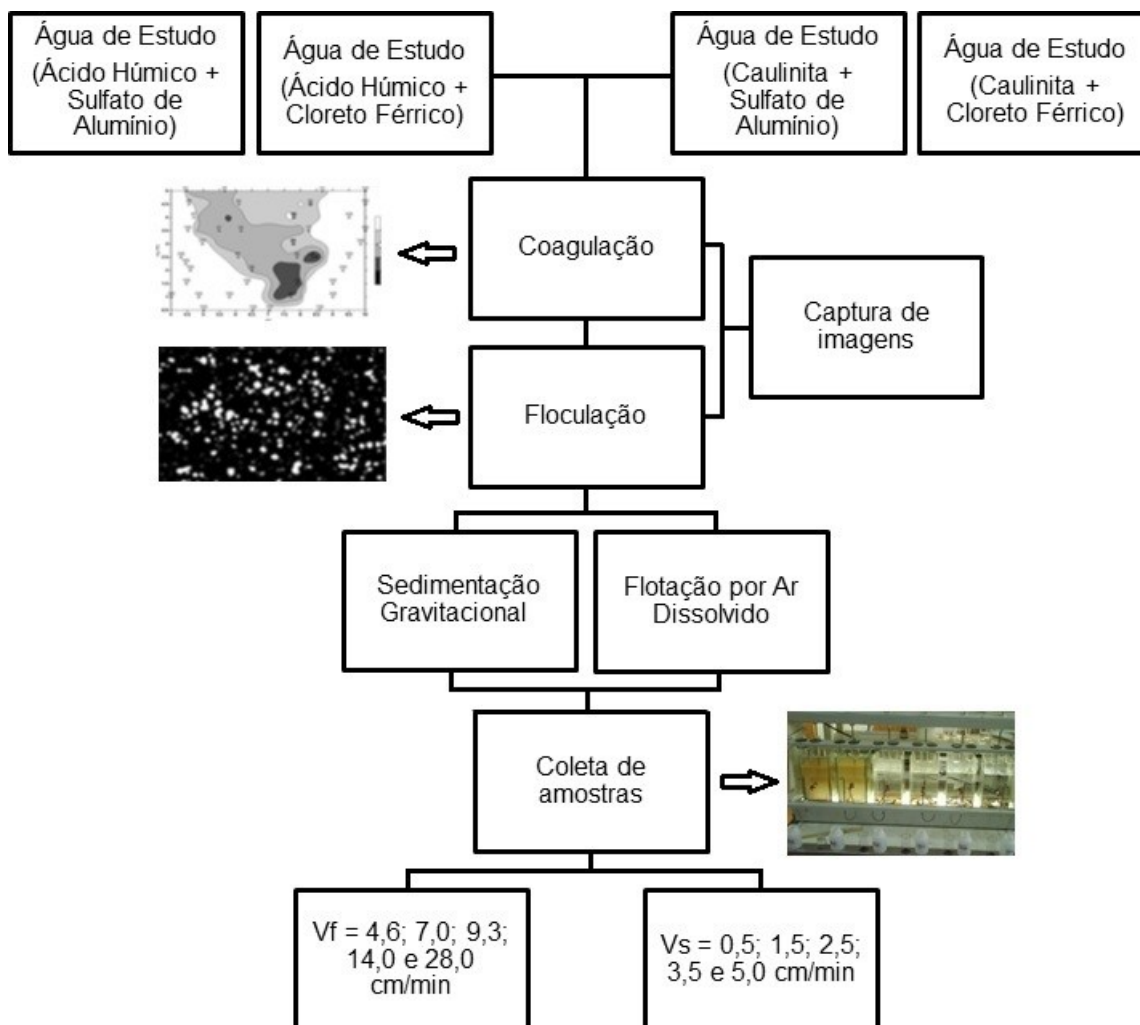


Figura 2. Fluxograma geral esquemático dos ensaios propostos.

4.2 Águas de estudo

4.2.1 Preparação das águas de estudo

As águas utilizadas nesse estudo foram sintéticas, preparadas com água destilada e deionizada, devidamente armazenadas em galões limpos brancos leitosos.

Foram utilizados quatro tipos de águas de estudo, abaixo será descrita a elaboração de cada uma.

A água 1 foi preparada com água destilada e deionizada e solução de ácido húmico comercial (*Aldrich Chemical*). A solução foi produzida a partir da adição de

ácido húmico na concentração de 0,62 g/L dissolvido em água e agitado por 3h. Posteriormente, a solução foi diluída na proporção 1:20 e filtrada em membrana de 0,45 µm através de osmose reversa, de modo a resultar em 50 ± 5 uC. O processo de extração da substância húmica foi de acordo com Constantino (2008) e Yu *et al.* (2010).

Para a coagulação foi utilizada solução preparada a partir do sal metálico de alumínio (Al^{+3}) na forma de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$ na concentração de 2 mg Al^{+3} /L. Para o controle de pH foi utilizada solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 10 g/L.

A água 2 foi preparada com água destilada e solução de caulinita, conforme Pádua (1994) descreve. Foi elaborada uma suspensão-mãe de caulinita e água destilada na concentração de 20 g/L, essa solução foi agitada por 2h em velocidade alta (800 s^{-1}) e após 12 horas de descanso o sobrenadante foi retirado e diluído até ser obtida a turbidez de 25 ± 2 uT. Essa solução diluída foi utilizada como água de estudo.

Para a coagulação foi utilizada solução preparada a partir do sal metálico de alumínio (Al^{+3}) na forma de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$ na concentração de 2 mg Al^{+3} /L. Para o controle de pH foi utilizada solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 10 g/L.

A água 3 foi preparada com água destilada e solução de ácido húmico comercial (*Aldrich*). A solução foi preparada a partir da adição de ácido húmico na concentração de 0,62 g/L dissolvido em água e agitado por 3h. Posteriormente, a solução foi diluída na proporção 1:20 e filtrada em membrana de 0,45 µm, de modo a resultar em 50 ± 5 uC. O processo de extração da substância húmica foi de acordo com Constantino (2008) e Yu *et al.* (2010).

Para a coagulação foi utilizada solução preparada a partir do sal metálico de ferro (Fe^{+3}) na forma de FeCl_3 na concentração de 5 mg Fe^{+3} /L. Para o controle de pH foi utilizada solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 10 g/L.

A água 4 foi preparada com água destilada e solução de caulinita *Fluka*, conforme Pádua (1994) e Yuxselen e Gregory (2004) descrevem. Foi elaborada uma suspensão-mãe de caulinita e água destilada na concentração de 20 g/L, essa solução foi agitada por 2h em velocidade alta (800 s^{-1}) e após 12 horas de descanso o sobrenadante foi retirado e diluído até ser obtida a turbidez de 25 ± 2 uT. Essa solução diluída foi utilizada como água de estudo.

Para a coagulação foi utilizada solução preparada a partir do sal metálico de ferro (Fe^{+3}) na forma de FeCl_3 na concentração de 5 mg Fe^{+3} /L. Para o controle de pH foi utilizada solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 10 g/L.

O ensaio de coagulação envolveu a investigação em diferentes dosagens de coagulante e pH de coagulação e seus resultados produziram diagramas de coagulação/floculação, os quais foram parte integrante de um trabalho do mesmo grupo de pesquisa. A partir do diagrama de coagulação/floculação obteve-se a dosagem ótima dos coagulantes e o respectivo pH de coagulação, sendo tais valores usados nas etapas subsequentes do trabalho.

4.2.2 Parâmetros de qualidade das águas de estudo

Foram medidos parâmetros de qualidade das águas de estudo com ácido húmico e das águas de estudo com caulinita.

A Tabela 1 apresenta alguns parâmetros de qualidade da água para as águas de estudo preparadas com ácido húmico.

Tabela 1. Parâmetros de qualidade para as águas de estudo tipo 1 e 3.

Parâmetro	Método/Equipamento	Limites de quantificação
Turbidez	Turbidímetro	0 - 1000
Condutividade	Condutivímetro	0 - 20.000
Dureza Total	Titulação volumétrica	2 - 200
Alcalinidade	Titulação volumétrica	20 - 400
pH	pHmetro	0 - 14

* Desvio padrão

A Tabela 2 apresenta alguns parâmetros de qualidade da água para as águas de estudo preparadas com caulinita.

Tabela 2. Parâmetros de qualidade para as águas de estudo do tipo 2 e 4.

Parâmetro	Método/Equipamento	Limites de quantificação
Turbidez	Turbidímetro	0 - 1000
Condutividade	Condutivímetro	0 - 20.000
Dureza Total	Titulação volumétrica	2 - 200
Alcalinidade	Titulação volumétrica	20-400
pH	pHmetro	0 - 14

* Desvio padrão

4.3 Ensaio de Floculação

Para a separação sólido/líquido em escala de laboratório foram empregados os equipamentos *Jar Test* e Floteste. As dosagens de coagulante e o pH de coagulação adequado foram obtidos previamente em ensaios de determinação de dosagens dos floculantes e de correção do pH.

As águas de estudo foram levadas aos equipamentos *Jar Test* e Floteste onde os processos de coagulação/floculação foram realizados sob condições controladas de mistura e tempo, medidos por meio do gradiente de velocidade médio (G_f) e do tempo de floculação (tf).

Para a coagulação, a mistura composta pela água de estudo, agente coagulante e agente alcalinizante foi agitada ao Gradiente Médio de Velocidade de Mistura Rápida (G_{mr}) de 800 s^{-1} por 10 segundos.

Os ensaios de floculação ocorreram para ambos os processos de Sedimentação Gravitacional e Flotação por Ar Dissolvido nos Gradientes de floculação de $Gf_1=20\text{ s}^{-1}$, $Gf_2=40\text{ s}^{-1}$, $Gf_3=60\text{ s}^{-1}$ e $Gf_4=80\text{ s}^{-1}$ para os tempos de floculação (tf) de 5, 10, 15, 20 e 25 min.

Essas condições podem ser melhor entendidas a partir da interpretação da Figura 3 abaixo.

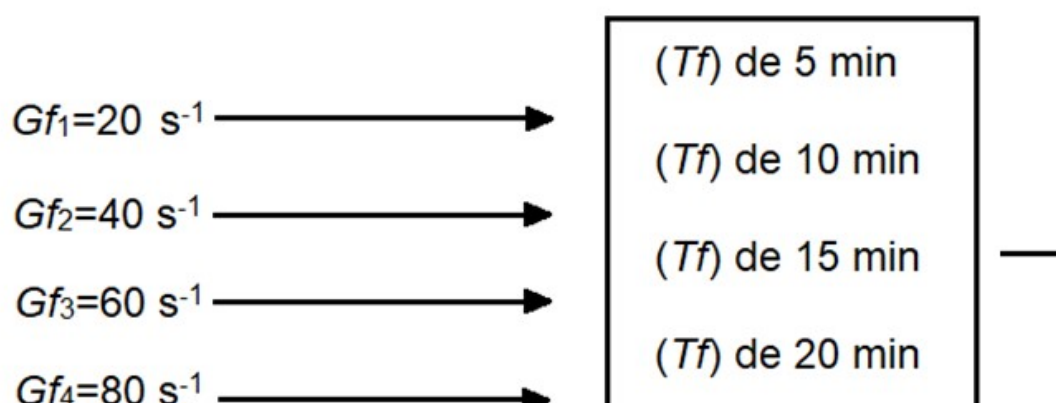


Figura 3. Organograma das condições de análise. As águas de estudo foram submetidas aos processos de separação nas condições de Gradiente de Floculação relacionadas a cada Tempo de Floculação.

Em resumo, os ensaios consistiram em coagulação/floculação, e submeter aos processos de sedimentação e flotação, retirando-se amostras para avaliar a cor aparente e a turbidez, respectivamente para cada água de estudo, nas velocidades de sedimentação e flotação estabelecidas nesse estudo.

4.4 Monitoramento dos agregados formados durante a floculação

A etapa de monitoramento foi utilizada para aquisição e tratamento de imagens dos agregados formados durante todas as condições de floculação. Essas imagens, após tratamento, permitiram a determinação dos parâmetros de distribuição de tamanho de agregados, β (beta) e Dimensão de Fractal.

Para obtenção das imagens foi utilizada câmera *Vision Research Miro EX4* acoplada a um conjunto de lentes permitindo resolução de 840 x 680 com tamanho de pixel de 0.119 mm, disparo contínuo e velocidade de captura de 1260 fps, conforme descrito em Oliveira et al. (2015). A lente escolhida tem distância focal equivalente de 50 mm, F-Stop igual a 2.8 e controles de íris e de zoom manuais, os quais foram ajustados de forma a obter melhor foco e nitidez.

A câmera fotográfica foi gerenciada através de um computador por meio do aplicativo *Phantom Câmera Control version 2.2 (PCC 2.2)*. Esse programa possibilitou escolher as melhores condições de contraste, brilho, tempo de abertura do obturador e frequência de disparos da câmera, sendo utilizados os valores:

Resolução: 600x800; Tempo de exposição: 200 μ s e Frequência de disparo: 10Hz. Esses métodos foram também utilizados por Moruzzi (2014) e Oliveira et al., 2015.

A iluminação foi baseada em Gregory e Chung (1995), Moruzzi e Reali (2007) e Almeida (2017). Foi utilizado um plano de laser (Green Laser Pointer), perpendicular ao jarro, de 20.000 mW de potência com comprimento de onda de 532 nm e com 2 mm de espessura do plano. O foco do sistema óptico de captura de imagens foi ajustado com uma lente especial para emissão de feixe de luz planar, evidenciando apenas um plano de luz para que o fotodetector registrasse as imagens dos flocos que atravessasse o campo de luz.

A câmera foi posicionada a aproximadamente 10 cm da cuba acrílica do *Jar Test* e ortogonalmente ao plano do laser (Figura 4), á fim de captar a reflexão dos raios de luz do laser após terem sido incididos no jarro e refletidos pelas partículas floculadas.

Esse método não intrusivo, utilizando captura de imagens sem retirada dos flocos do jarro, tem como principal vantagem o fato de que as amostras podem ser estudadas sem risco de deformação ou alteração decorrente da ruptura dos flocos.

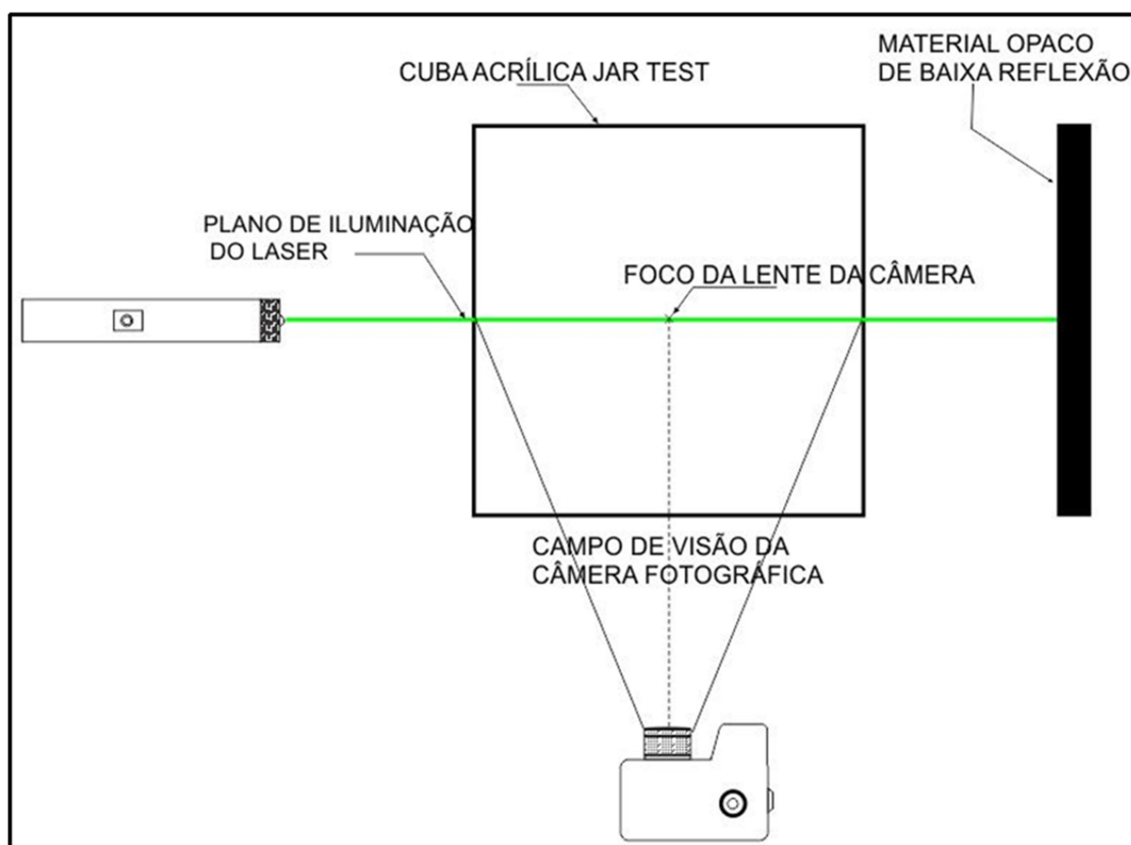


Figura 4. Arranjo experimental de bancada. FONTE: Silva (2016).

Na Figura 5 apresenta-se um esquema do aparato experimental: equipamento de bancada *Jar Test* acoplado a um sistema não intrusivo de captura de imagens, laser e microcomputador para armazenamento e tratamento das imagens.

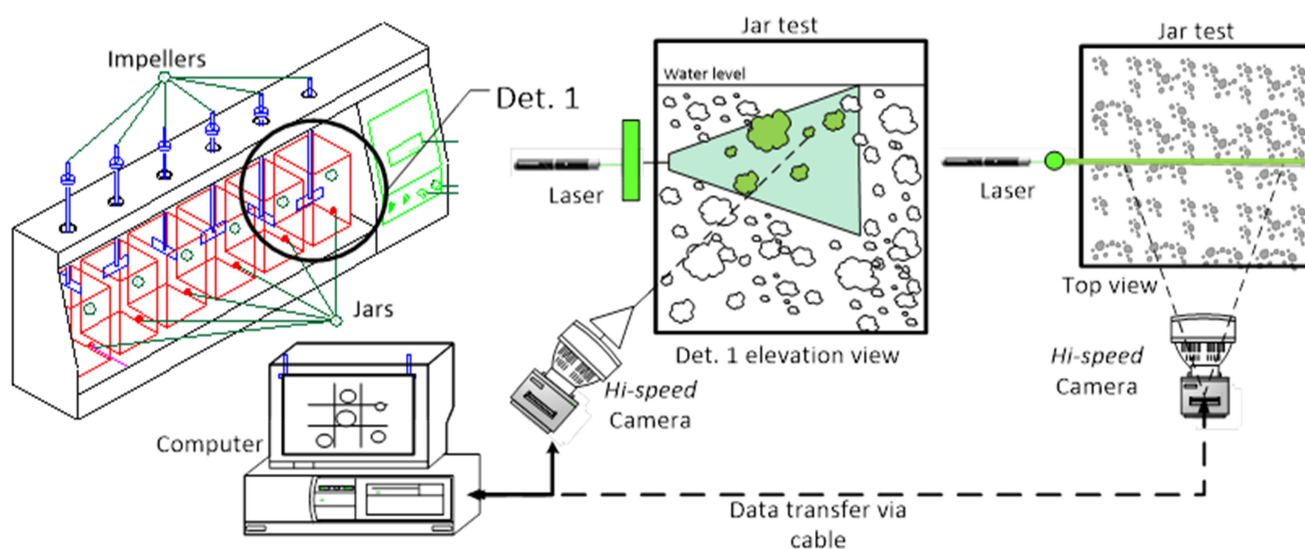


Figura 5. Esquema do arranjo experimental utilizado nos ensaios (*Jar Test*, Microcomputador, Câmera digital e Laser). Extraído de Oliveira et al. (2015).

O arranjo experimental utilizado para o processo de flotação por ar dissolvido se assemelha ao exemplificado para o processo de sedimentação (Figura 5), com única diferença no equipamento separação sólido-líquido, o qual ao invés de *Jar Test* foi utilizado floteeste, que possui uma câmara de ar pressurizado para produção de bolha de ar, permitindo a ascensão dos flocos.

Os procedimentos para captura e tratamento das imagens empregados nesse estudo foram os mesmos aplicados em Moruzzi (2005) e apresentados em Moruzzi e Reali (2007), Moruzzi e Reali (2010), e Almeida (2017).

Em termos gerais, os passos realizados consistiram em: aquisição das imagens; tratamento digital; calibração; determinação das feições de interesse (diâmetro e área dos flocos). Posteriormente, a partir dos dados, foram obtidas as funções discretas de Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP), Dimensão do Fractal (Df) e β .

Após a captura, as imagens foram armazenadas e tratadas em um microcomputador para posterior obtenção dos parâmetros de interesse. O tratamento das imagens foi realizado com auxílio do software *Image-Pro Plus*® que facilita a determinação do que é considerado partícula primária e do que é considerado floco agregado. Para diminuir a possibilidade de erro na contagem dos flocos e determinação de seus parâmetros, o tamanho do menor floco foi considerado como sendo 10 pixels na imagem digital, ou seja, somente flocos com tamanho maior que 10 pixels foram considerados. Tal procedimento foi baseado em recomendações constantes em Moruzzi e Reali (2010).

Para a realização do tratamento das imagens, cada imagem original obtida pela câmera foi transformada em uma matriz binária. A binarização consistiu em transformar a imagem que contém pixels em escala de cinza, variando de 0 (totalmente preto) a 255 (totalmente branco), em uma imagem binária contendo pixels com valor 0 (preto) e 1 (branco). O processo de contagem enumera todos os conjuntos de pixels brancos (flocos ou partículas), enquanto a mensuração, por meio de calibração com objeto de dimensão conhecida, atribui dimensões aos flocos capturados, possibilitando assim, saber a quantidade de flocos e seu tamanho, em cada imagem obtida.

Dentro da binarização adotou-se o limiar que permitiu a segmentação e determinação dos atributos de interesse. Os procedimentos usados foram adaptados de Moruzzi e Reali (2007) e podem ser consultados para melhor entendimento do processamento dos dados.

A matriz binária resultante foi manuseada estatisticamente no software *Microsoft Excel 2010*® e o processamento das imagens geraram planilhas de dados de diâmetro, área e quantidade numérica dos flocos. Dentre os dados relevantes a este estudo estão os histogramas da DTP, gráficos de fractal, tabelas com dados sobre área, diâmetro médio, mediana, assimetria dos diâmetros dos flocos em cada condição estipulada nesse estudo.

Posteriormente a binarização procedeu-se a contagem dos flocos, obtenção dos dados de área e diâmetro médio e determinação dos atributos de interesse. Esses dados fornecem informações das características físicas dos flocos e permite obter informações do comportamento dos mesmos submetidos a diferentes condições de agitação e tempos de floculação.

4.5 Ensaio de sedimentação

Para a operação de Sedimentação Gravitacional, foram realizados testes nos gradientes de floculação de $Gf_1=20 \text{ s}^{-1}$, $Gf_2=40 \text{ s}^{-1}$, $Gf_3=60 \text{ s}^{-1}$ e $Gf_4=80 \text{ s}^{-1}$, com tempos de floculação (tf) de 5, 10, 15, 20 e 25 min, para cada gradiente mencionado, e foram coletadas amostras da água para análise de cor (água preparada com ácido húmico) e turbidez (água preparada com caulinita). As amostras foram retiradas nas velocidades de sedimentação de 0,5; 1,5; 2,5; 3,5 e 5,0 cm/min.

A Tabela 3 ilustra os gradientes de floculação e os tempos de floculação que foram combinados um a um para o processo de sedimentação, mostra também as velocidades de sedimentação em que as amostras de cor aparente e turbidez foram coletadas.

Tabela 3. Relação de Gf e tf , e Vs em que as amostras de cor aparente e turbidez foram coletadas.

Gradiente de Floculação	Tempo de Floculação	Velocidade de Sedimentação
(Gf) de 20, 40, 60 e 80 s^{-1}	(tf) de 5, 10, 15, 20 e 25 min	(Vs) de 0,5; 1,5; 2,5; 3,5 e 5,0 cm/min

Foi considerado o volume retirado em cada amostra e que conseqüentemente diminuiu no jarro do *Jar Test*, para que as velocidades de sedimentação em que as amostras foram coletadas sejam criteriosamente seguidas.

O desempenho da sedimentação foi avaliado por meio das medidas de fração residual remanescente de cor aparente e de turbidez (*Frr*).

4.6 Ensaios de flotação

Para o processo de Flotação por Ar Dissolvido, foram realizados testes nos gradientes de floculação de $Gf_1=20\text{ s}^{-1}$, $Gf_2=40\text{ s}^{-1}$, $Gf_3=60\text{ s}^{-1}$ e $Gf_4=80\text{ s}^{-1}$, com tempos de floculação (*tf*) de 5, 10, 15, 20 e 25 min, para cada gradiente mencionado, e foram coletadas amostras da água para análise de cor (água preparada com ácido húmico) e turbidez (água preparada com solução de caulinita). As amostras foram retiradas nas velocidades de flotação de 4,6; 7,0; 9,3; 14,0 e 28,0 cm/min.

A Tabela 4 ilustra os gradientes de floculação e os tempos de floculação que foram combinados um a um para o processo de flotação, mostra também as velocidades de flotação em que as amostras de cor aparente e turbidez foram coletadas.

Tabela 4. Relação de *Gf* e *tf*, e *Vf* em que as amostras de cor aparente e turbidez foram coletadas.

Gradiente de Floculação	Tempo de Floculação	Velocidade de Flotação
(<i>Gf</i>) de 20, 40, 60 e 80 s ⁻¹	(<i>Tf</i>) de 5, 10, 15, 20 e 25 min	(<i>Vs</i>) de 4,6; 7,0; 9,3; 14,0 e 28,0 cm/min

Foi considerado o volume retirado em cada amostra e que conseqüentemente diminuiu no jarro do floteste, para que as velocidades de flotação em que as amostras foram coletadas sejam criteriosamente seguidas.

O desempenho da flotação foi avaliado por meio das medidas de fração residual remanescente de cor aparente e de turbidez (*Frr*).

4.7 Fração Residual Remanescente

A Fração Residual Remanescente (*Frr*) é uma fração residual de cor aparente ou turbidez que restou na água após ser aplicado o processo de separação sólido/líquido, é explícita pela Equação 1 (para água de estudo preparada com ácido húmico) e pela Equação 2 (para água de estudo preparada com caulinita).

Esse conceito foi utilizado para avaliar a eficiência do processo de remoção (Equação 2). Podemos observar pela interpretação da equação que quanto menor o valor numérico da *Frr*, maior é a eficiência do processo de remoção.

$$Frr = \frac{C}{C_0} \quad (1)$$

$$Frr = \frac{T}{T_0} \quad (2)$$

$$E = (1 - Frr) \quad (3)$$

Onde: *C* = cor aparente residual da amostra após sedimentação ou flotação na velocidade estudada (uC); *C₀* = cor aparente da água bruta (uC); *T* = turbidez residual da amostra após sedimentação ou flotação na velocidade estudada (uT); *T₀* = turbidez da água bruta (uC); *E* = eficiência de remoção; *Frr* = Fração Residual Remanescente.

A Fração Residual Remanescente foi usada visando avaliar indiretamente o desempenho da remoção das partículas na sedimentação e na flotação.

Para as águas preparadas com ácido húmico a cor aparente da água na condição inicial do ensaio foi utilizada como referência para *Frr*. Para as águas com preparadas com caulinita a turbidez da água na condição inicial do ensaio foi utilizada como referência para *Frr*.

O valor da Frr foi medido em cada velocidade de sedimentação e flotação, para cada condição de mistura investigada. Assim, foram construídas curvas que relacionam os valores de Frr com as velocidades de sedimentação e de flotação, as quais constituem curvas de sedimentação e curvas de flotação, conforme Di Bernado e Dantas (2005).

4.8 Determinação de Parâmetros de interesse

4.8.1 Dimensão de Fractal

As hipóteses de forma circular e de porosidade nula (compacta) envolvidas na simplificação da avaliação direta de material particulado ainda constituem um grande desafio, visto que nos flocos predominam formas irregulares e estruturas porosas (OLIVEIRA et al., 2015).

Por esse motivo, para caracterização da estrutura morfológica dos flocos será utilizado o conceito de fractal. Isso porque as definições tradicionais baseadas na geometria euclidiana falham para definir as dimensões dos agregados, devido ao fato dos agregados se unirem de forma desordenada, podendo haver regiões dentro do floco não preenchidas por partículas.

Pode-se descrever uma relação entre área A , uma dimensão característica de tamanho L , e a Dimensão Fractal de área Df pela Equação 4.

$$A \propto L^{Df} \quad (4)$$

Onde: A = correspondente a soma das áreas de todas as partículas primárias contidas dentro da dimensão L ; L = dimensão de tamanho do floco.

A Dimensão de Fractal pode ser definida em linear, plano ou tridimensional. Considerando o valor bi-dimensional, o valor de Df varia de 1 a 2, sendo o valor 2 representativo de um círculo perfeito.

O valor de Dimensão de Fractal auxilia a entender qual a feição dos flocos formados a partir de características de área e massa dos flocos, isso porque agregados compactos possuem uma Dimensão Fractal mais elevada, enquanto agregados com estruturas soltas (vazios em seu interior), possuem uma Dimensão Fractal inferior como aponta Li et al. (2006).

O valor numérico de Df corresponde a inclinação da reta de ajuste à distribuição dos pontos do gráfico gerado pelos diâmetros e áreas dos flocos.

Para estudar a Dimensão de Fractal dos flocos, foram obtidos os diâmetros dos flocos em todas as condições de velocidade e agitação analisadas, através do método de captura de imagens pela câmera e programa computacional.

O diâmetro dos flocos foi utilizado como dimensão característica em relação à área para se obter a análise da forma dos flocos. A relação da área A de um objeto plano com seu diâmetro d será descrita na Equação 5.

$$A = k \cdot d^{Df} \quad (5)$$

Onde: A = correspondente a soma das áreas de todas as partículas primárias contidas dentro da dimensão d ; k = constante de ajuste; Df = Dimensão de Fractal (seu valor varia de 1 a 2); d = diâmetro do floco. Linearizando a Equação 5 obtém-se a Equação 6.

$$\ln A = \ln k + Df \cdot \ln d \quad (6)$$

A partir da Equação 6 foi possível obter o valor de Dimensão de Fractal e a feição dos flocos analisados. A Dimensão Fractal foi calculada para toda a população de flocos de cada condição estipulada nos itens 4.5 Ensaios de sedimentação e 4.6 Ensaios de flotação. O valor de Df corresponde a inclinação da reta de ajuste à distribuição dos pontos do gráfico gerado pelos diâmetros e áreas dos flocos.

4.8.2 Distribuição do Tamanho de Partículas (DTP)

A Distribuição do Tamanho de Partículas recebe interferência dos processos de coagulação e floculação, promovendo alteração nos efeitos de agregação, choque, e ruptura dos flocos (ZHANG et al., 2011), interferindo na morfologia. A DTP depende do gradiente médio de floculação (Gf) e do tempo de exposição das partículas floculentas a este gradiente. Ela pode ser determinada em função de uma série de parâmetros, entre os quais: diâmetro, volume e área.

A DTP é essencialmente uma análise gráfica que permite classificar os agregados por faixa de tamanho, ou seja, permite obter uma caracterização geral do tamanho dos agregados formados naquela condição específica.

Para cada condição investigada nesse trabalho foram gerados gráficos de DTP em intervalos discretos pré-estabelecidos, a partir dos quais foram ajustadas as curvas contínuas de distribuição para determinação do parâmetro representativo (β), através da Equação 7.

4.8.3 Parâmetro representativo da função contínua de distribuição de tamanho (β)

O parâmetro β é um conceito que pode ser utilizado para avaliar como ocorre a distribuição do tamanho de agregados pelo número total destes, ou seja, é o parâmetro característico da função de distribuição de tamanho de agregados.

A interpretação de parâmetro pode ser feita a partir de seu valor numérico, onde um maior valor de β indica que a amostra possui maior concentração de flocos

de pequeno diâmetro, e um menor valor de β indica que a amostra possui quantidade considerável de flocos de maior diâmetro.

Para se obter esse parâmetro foi utilizada a Equação 7, extraída de Amirtharajah & O'Melia (1999).

$$\frac{dN}{d(d_p)} = n^o(d_p) = A_o(d_p)^{-\beta} \quad (7)$$

Onde: dN = número de partículas por unidade de volume do fluido na faixa correspondente a d_p até $d_p + d(d_p)$; d_p = diâmetro da partícula; $n^o(d_p)$ = função de Distribuição de Tamanho de Partículas; A_o = coeficiente relacionado a concentração total de partículas; β = coeficiente que caracteriza a distribuição de tamanho.

A partir da Equação 7 foram produzidos gráficos de distribuição de tamanho de agregado para visualização e obtenção da inclinação da reta (valor de β), onde quanto maior a inclinação, maior a ocorrência de agregados pequenos distribuídos nas faixas de classificação de tamanho.

4.9 Eficiência dos processos de sedimentação e FAD

Esses parâmetros mencionados auxiliam no conhecimento das características morfológicas dos flocos, e foram analisados com a finalidade de verificar quais as melhores condições de agregados para obter melhor eficiência de remoção dos processos de separação sólido-líquido estudados.

A eficiência de separação por sedimentação e por Flotação por Ar Dissolvido foi avaliada por meio das curvas de remoção para diferentes velocidades associadas (Fração Residual Remanescente). Essas curvas relacionaram a cor e a turbidez residual da amostra em cada Velocidade de Sedimentação (V_s) e de Flotação (V_f).

Através dos resultados de residuais remanescentes, parâmetros de características físicas dos flocos e da ferramenta de análise ACP foram determinados quais os principais parâmetros determinantes na eficiência dos processos de separação mencionados.

4.10 Análise de Componentes Principais (ACP) integrada ao trabalho

4.10.1 Correlação

Para ser possível fazer a Análise de Componentes Principais é necessário que os dados a serem analisados sejam correlacionados entre si, por esse motivo foram calculados os coeficientes de correlação entre pares de todos atributos medidos.

Foi gerada uma planilha de correlação para cada caso de análise estudado.

4.10.2 ACP

A ACP foi utilizada nesse trabalho para verificar as principais variáveis responsáveis pelas características físicas resultantes/finais dos flocos em cada condições de $Gf \times tf$, ou seja, para a investigação da existência de grupos de variáveis semelhantes que possam explicar e relacionar as características físicas dos agregados com as melhores condições de remoção de cor/turbidez a partir dos processos de separação estudados.

Para isso foram determinadas como variáveis para a ACP o valor de β , Dimensão de Fractal, diâmetro médio, e Residual Remanescente nas Velocidades de Sedimentação de 0,5; 1,5; 2,5; 3,5 e 5,0 cm/min para a análise do processo de Sedimentação e Residual Remanescente nas Velocidades de Flotação de 4,6; 7,0; 9,3; 14,0 e 28,0 cm/min para a análise do processo de Flotação por Ar Dissolvido, respectivamente. Com isso foram encontradas 5 Componentes Principais para cada condição, entretanto de acordo com o critério de Kaiser somente as CP's com autovalores maiores que 1 foram consideradas representativas.

A ACP foi realizada para os dois processos de separação sólido/líquido, Sedimentação e FAD e para as 4 águas estudadas, ou seja, foram feitas 8 análises distintas, representadas na Figura 6 abaixo:

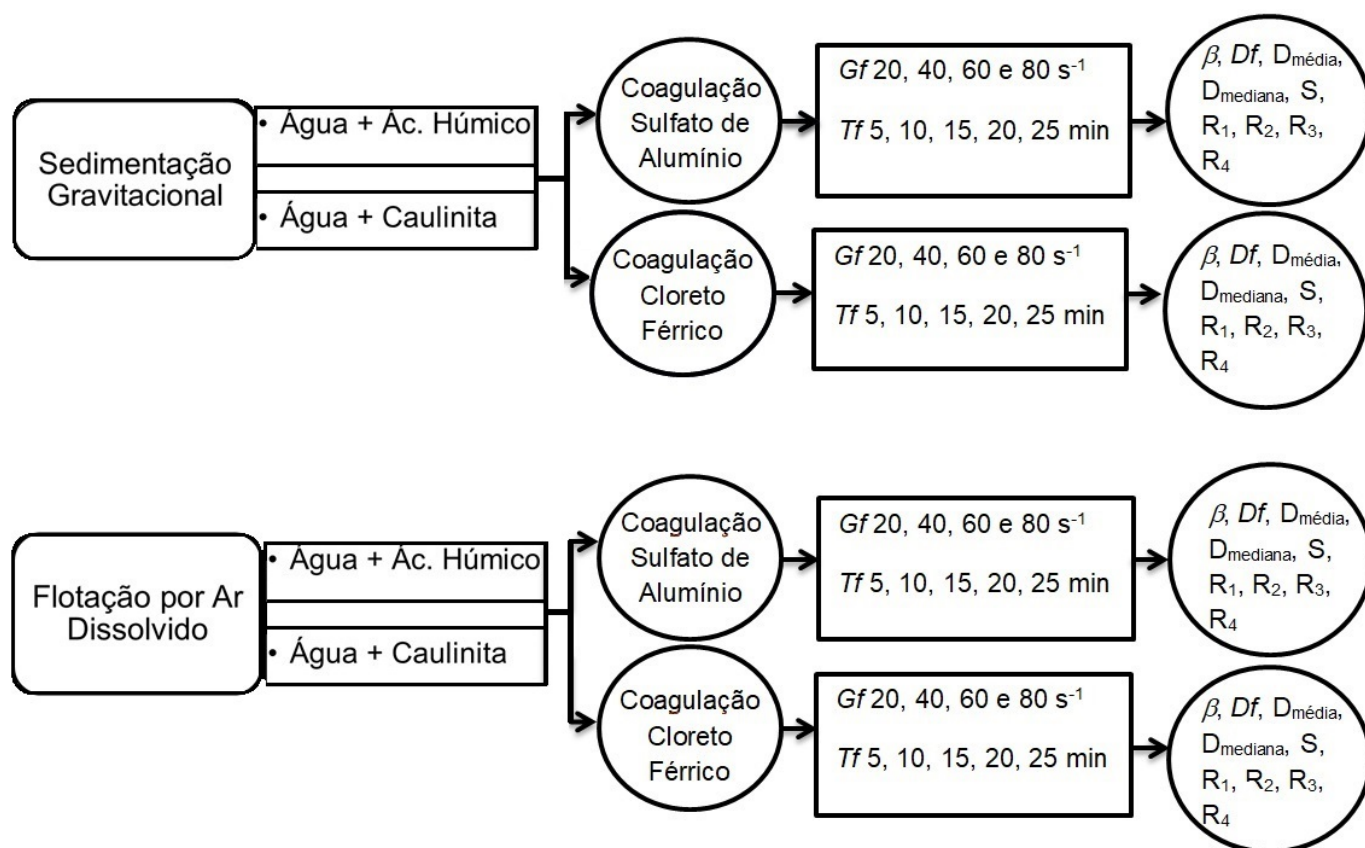


Figura 6. Fluxograma explicativo das variáveis relacionadas aos seus respectivos processos de separação, as quais foram submetidas a Análise de Componentes Principais.

De acordo com a Figura 6 é possível perceberem que foram realizadas 8 análises. Dessas 8 condições, em 6 delas foi possível obter resultados parciais, componentes principais e gráficos ilustrativos, além dos coeficientes estatísticos listados no item 3.3.2.

As condições em que foram realizadas as 8 análises se encontram descritas na Figura 7.

Condições de estudo em que foram aplicadas a ACP	
Condição de análise 1	Sedimentação para água preparada com ácido húmico e coagulada com Sulfato de Alumínio
Condição de análise 2	Sedimentação para água preparada com caulinita e coagulada com Sulfato de Alumínio
Condição de análise 3	Flotação para água preparada com ácido húmico e coagulada com Sulfato de Alumínio
Condição de análise 4	Flotação para água preparada com caulinita e coagulada com Sulfato de Alumínio
Condição de análise 5	Sedimentação para água preparada com ácido húmico e coagulada com Cloreto Férrico
Condição de análise 6	Sedimentação para água preparada com caulinita e coagulada com Cloreto Férrico
Condição de análise 7	Flotação para água preparada com ácido húmico e coagulada com Cloreto Férrico
Condição de análise 8	Flotação para água preparada com caulinita e coagulada com Cloreto Férrico

Figura 7. Condições que foram submetidas as análises.

O programa utilizado para realizar a ACP foi o software livre RStudio®, um software de ambiente de desenvolvimento integrado para o R, que é uma linguagem de programação para gráficos e cálculos estatísticos.

Esse software pode ser obtido gratuitamente através do link <https://www.rstudio.com/products/rstudio/download/> que também está disponível para download no site do RStudio. A partir dele é possível fazer a ACP e obter as formas gráficas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Resultados Fração Residual Remanescente (F_{rr})

A eficiência de separação por Sedimentação e FAD foram avaliadas por meio da construção das curvas de remoção, expressas em termos de fração residual remanescente (F_{rr}), para diferentes velocidades de sedimentação (V_s) associadas e diferentes gradientes médios de velocidade (Gf) e tempos de floculação (tf).

A partir dessas curvas de remoção foram construídos gráficos de Fração Residual Remanescente para cada conjunto $V_s \times Gf \times tf$.

A Figura 8 mostra a título de exemplo um gráfico obtido para a condição de análise 1.

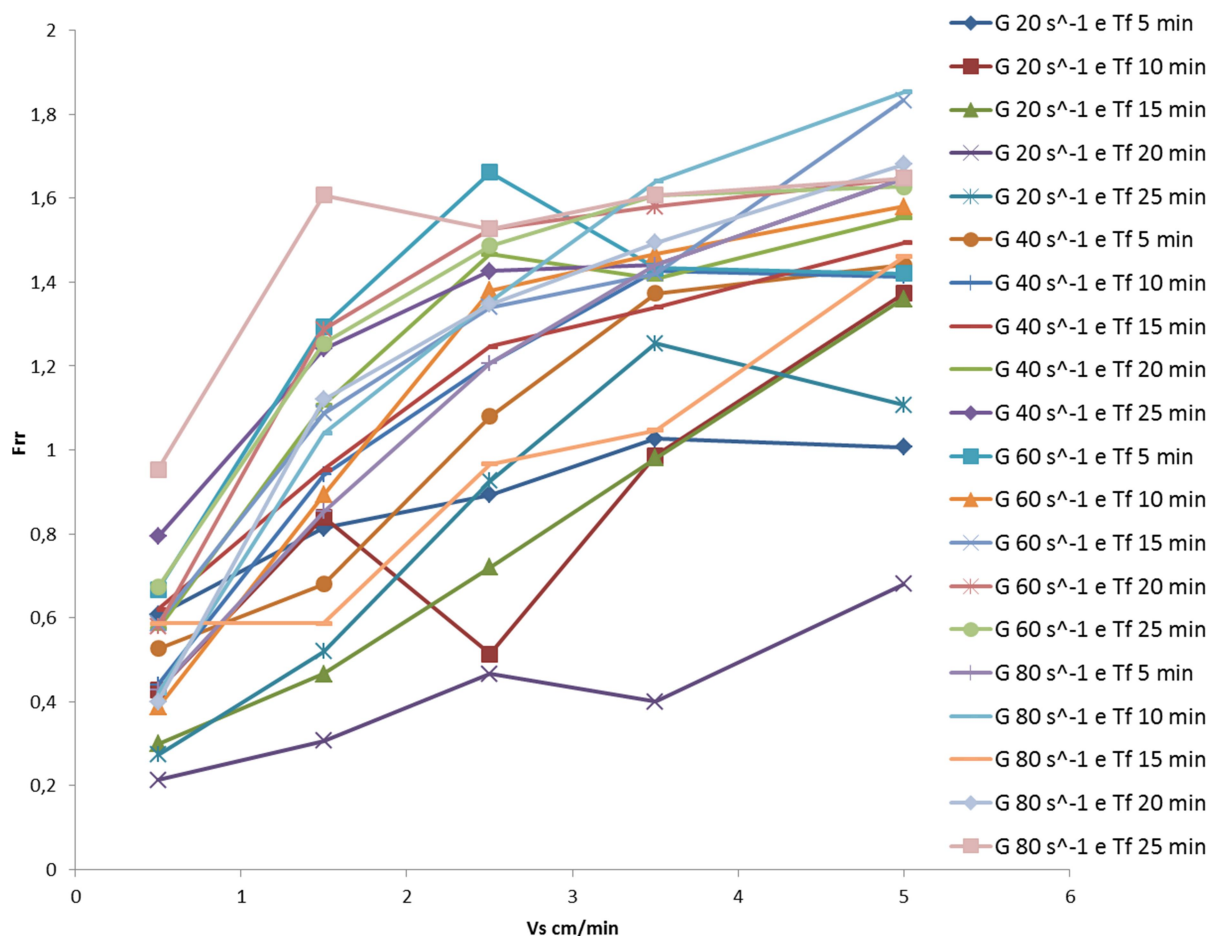


Figura 8. Gráfico de Fração Residual Remanescente de todos os gradientes estudados (Gf 20, 40, 60 e 80 s⁻¹) e tempos (tf 5, 10, 15, 20 e 25 min).

Nota-se claramente a influência de Gf e tf no desempenho da operação de remoção por sedimentação, onde a posição das curvas determinam diferentes desempenhos de separação por sedimentação (Figura 8). Merece destaque o fato de que, em alguns casos, o valor de Frr excedeu a unidade (1), devido a adição de coagulante na fase de coagulação e floculação ter excedido a referência de cor aparente da água bruta.

Essa análise foi realizada para todas as condições de estudo a fim de se obter a variável Frr .

5.2 Sedimentação para água preparada com ácido húmico e coagualada com Sulfato de Alumínio (Condição de Análise 1)

5.2.1 Correlação

A tabela 5 apresenta resultado parcial da ACP da condição 1.

De acordo com o Teste de esfericidade de Barlett, verificamos que a Tabela 5 abaixo possui grandes indícios de que existam correlações significativas entre as variáveis, devido ao fato da matriz de correlação não ser identidade.

Tabela 5. Matriz de correlação dos dados de Sedimentação com água de ácido húmico e coagulada com Sulfato de Alumínio obtida através do Rstudio®.

	<i>Tf</i>	β	<i>Df</i>	dmédia	Residual Remanescente
<i>Tf</i>	1,00	-0,38	-0,25	-0,06	0,09
β	-0,38	1,00	0,54	0,11	-0,22
<i>Df</i>	-0,25	0,55	1,00	0,82	-0,01
dmédia	-0,06	0,11	0,82	1,00	0,15
Residual	0,09	-0,22	-0,01	0,15	1,00

A partir da análise dessa tabela é possível perceber que os dados originais possuem correlação entre si, pois quanto maior o valor numérico em módulo associado às variáveis, mais alto é o valor da correlação.

A correlação é interpretada do seguinte modo:

- Valores acima de 0,70 indicam uma forte correlação;
- Valores entre 0,51 e 0,70 indicam uma correlação moderada;
- Valores abaixo de 0,51 indicam uma fraca correlação.

O sinal positivo determina que a correlação é diretamente proporcional, enquanto o sinal negativo, que a correlação é inversamente proporcional entre as variáveis.

A partir dessas premissas podemos constatar que os dados são correlacionados e isso indica que é passível de se utilizar o método de ACP para esse conjunto.

5.2.2 Componentes Principais

Na Tabela 6 estão apresentadas as Componentes Principais obtidas pela análise de ACP para a condição 1. As Componentes Principais são ordenadas em ordem decrescente, ou seja, a Componente Principal 1 tem maior representatividade dos dados do que a Componente Principal 2, e assim sucessivamente.

Tabela 6. Componentes Principais obtidos pela ACP no RStudio® a partir da rotação Rotação (n x k) = (5 x 5).

Componentes Principais	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
<i>Tf</i>	0,32	0,43	0,67	-0,52	0,01
<i>β</i>	-0,47	-0,42	-0,05	-0,69	-0,35
<i>Df</i>	-0,65	0,18	0,15	-0,04	0,72
dmédia	-0,51	0,49	0,20	0,33	-0,59
Residual Remanescente	0,05	0,61	-0,70	-0,37	0,02

É importante salientar que o número máximo de CP's obtidas sempre será equivalente ao número de quantidade de variáveis estudadas, porém cabe ao pesquisador, a partir de um critério, estabelecer qual a porcentagem de explicação dos dados que deseja obter, selecionando as CP's com suas respectivas variâncias para utilizar em seu trabalho. Nesse estudo em específico foi usado o critério de Kaiser.

Na Tabela 7 é possível observar o desvio padrão, a proporção de variação e a proporção acumulada de cada CP.

Tabela 7. Importância dos Componentes Principais em ordem decrescente.

Componentes Principais	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Desvio padrão	1,47	1,16	0,93	0,76	0,23
Proporção de variância	0,43	0,27	0,17	0,12	0,01
Proporção acumulada	0,43	0,70	0,87	0,99	1,00

A Tabela 8 apresenta a variância calculada para cada CP. A variância auxilia, por meio do critério de Kaiser, a definir quais componentes principais serão utilizadas. Ou seja, as variâncias com valores numéricos maior ou igual a 1 definem que suas respectivas CP's vão ser utilizadas, e essas explicam maior porcentagem significativa dos dados originais.

As CP's com valor maior ou igual a 1 explicam a maioria da variação dos dados.

Tabela 8. Variância dos CP's de cada variável.

Componentes Principais	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Variâncias	2,17	1,34	0,86	0,58	0,05

Pela análise da Tabela 8 podemos perceber que a somatória das variâncias resulta em valor igual a 5, que equivale a 100% da variação dos dados, portanto o valor da CP1 com 2,17 de variância explica 43,4% dos dados, enquanto a CP2 com 1,34 de variância explica 26,8% dos dados e, juntas elas explicam 70,2% da variação total dos dados, o que, nesse estudo, é suficiente para a representação dos dados originais.

Sendo assim, as componentes principais que mais explicam a variabilidade dos dados são a CP1 e CP2 (Tabela 9). Estas foram selecionadas para uma análise mais aprofundada.

Tabela 9. Componente Principal 1 e 2.

	CP1	CP2
<i>Tf</i>	0,32	0,43
<i>β</i>	-0,47	-0,42
<i>Df</i>	-0,65	0,18
dmédia	-0,51	0,49
Residual Remanescente	0,05	0,61

É possível observar a partir da Tabela 9 que a Componente Principal 1 possui maiores valores em módulo para as variáveis *Df* e *dmédia* isso significa que a CP1 explica melhor as variáveis de Dimensão de Fractal e média dos diâmetros.

A Componente Principal 2 possui maior valor em módulo para a variável Residual Remanescente, isso significa que a CP2 explica melhor a variável de Residual Remanescente de cor.

Na Figura 9 podemos observar o círculo das correlações entre as CP1 e CP2.

A CP1 foi plotada no eixo das abcissas, e a CP2 no eixo das ordenadas. Com essas informações é possível depreender do gráfico que a CP1 explica melhor as variáveis de Dimensão de Fractal e média dos diâmetros. Enquanto a CP2 explica melhor a variável de Residual Remanescente.

Essas mesmas conclusões foram obtidas a partir da análise interpretativa dos dados numéricos das CP1 e CP2 (Tabela 9).

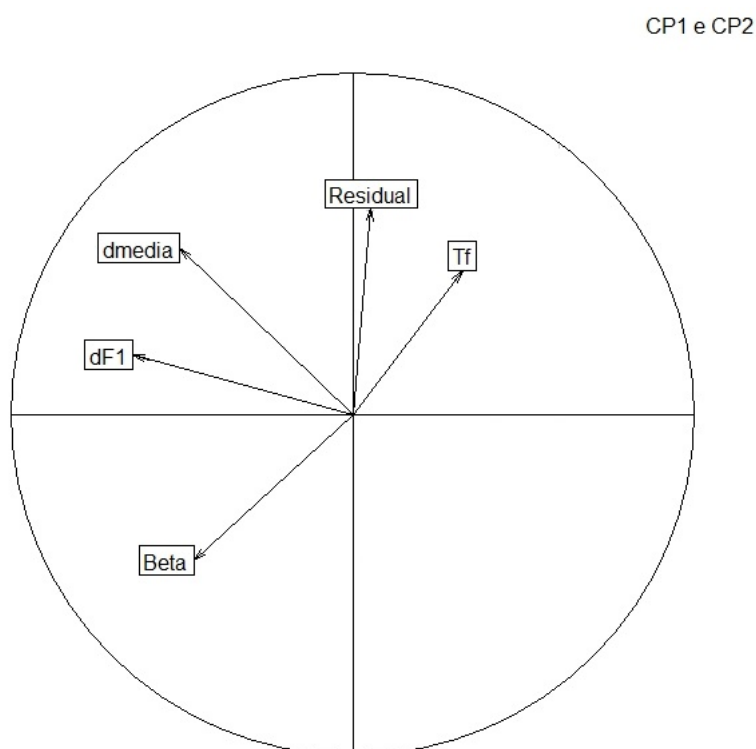


Figura 9. Gráfico círculo das correlações entre CP1 e CP2 para a condição de análise 1.

Como as CP1 e CP2 explicam juntas 70,2% dos dados, ou seja, a porção mais expressiva dos dados, isso significa que para a Sedimentação Gravitacional

com água preparada com ácido Húmico coagulada com Sulfato de Alumínio (condição 1), as variáveis mais determinantes foram o Residual Remanescente de cor, a média dos diâmetros e a Dimensão de Fractal.

Ou seja, essa condição de estudo (condição 1) foi caracterizada em sua maioria através da morfologia dos flocos formados, diâmetro médio, associados aos resultados de Residual Remanescente de cor. Isso implica que a forma e tamanho dos flocos foram determinantes no Residual Remanescente de cor, para essa condição.

É importante evidenciar também que a CP1 obteve correlação mais alta com a Dimensão de Fractal, isso indica que a morfologia dos flocos formados foi determinante para essa condição de processo de remoção por Sedimentação com água preparada com ácido húmico e coagulada com Sulfato de Alumínio.

A Tabela 10 mostra a título de exemplo a relação de indivíduos para a CP1 e CP2, essa relação é obtida a partir da multiplicação de cada Componente Principal (CP1 e CP2) por cada uma das variáveis. O conceito de indivíduos significa cada um dos “objetos”, linhas analisadas.

Tabela 10. Relação de indivíduos para as CP1 e CP2.

Gradiente Floc. Tempo Floc. Res. Remanescente	CP1	CP2
$Gf\ 20\ s^{-1}\ tf\ 5min\ Rr_1$	-1,30	-1,38
$Gf\ 20\ s^{-1}\ tf\ 5min\ Rr_2$	-1,30	-1,35
$Gf\ 20\ s^{-1}\ tf\ 5min\ Rr_3$	-1,31	-1,53
$Gf\ 20\ s^{-1}\ tf\ 5min\ Rr_4$	-1,32	-1,64
$Gf\ 20\ s^{-1}\ tf\ 5min\ Rr_5$	-1,35	-1,93
$Gf\ 20\ s^{-1}\ tf\ 10min\ Rr_1$	-0,66	-0,48
$Gf\ 20\ s^{-1}\ tf\ 10min\ Rr_2$	-0,70	-1,02
$Gf\ 20\ s^{-1}\ tf\ 10min\ Rr_3$	-0,76	-1,68
$Gf\ 20\ s^{-1}\ tf\ 10min\ Rr_4$	-0,72	-1,22
$Gf\ 20\ s^{-1}\ tf\ 10min\ Rr_5$	-0,77	-1,80
$Gf\ 20\ s^{-1}\ tf\ 15min\ Rr_1$	-0,22	0,11
$Gf\ 20\ s^{-1}\ tf\ 15min\ Rr_2$	-0,27	-0,42

$Gf\ 20\ s^{-1}\ tf\ 15min\ Rr_3$	-0,30	-0,78
$Gf\ 20\ s^{-1}\ tf\ 15min\ Rr_4$	-0,33	-1,13
$Gf\ 20\ s^{-1}\ tf\ 15min\ Rr_5$	-0,35	-1,36
$Gf\ 20\ s^{-1}\ tf\ 20min\ Rr_1$	-0,30	-0,61
$Gf\ 20\ s^{-1}\ tf\ 20min\ Rr_2$	-0,33	-1,00
$Gf\ 20\ s^{-1}\ tf\ 20min\ Rr_3$	-0,32	-0,91
$Gf\ 20\ s^{-1}\ tf\ 20min\ Rr_4$	-0,34	-1,13
$Gf\ 20\ s^{-1}\ tf\ 20min\ Rr_5$	-0,35	-1,26
$Gf\ 20\ s^{-1}\ tf\ 25min\ Rr_1$	1,18	-0,16
$Gf\ 20\ s^{-1}\ tf\ 25min\ Rr_2$	1,20	0,05
$Gf\ 20\ s^{-1}\ tf\ 25min\ Rr_3$	1,16	-0,41
$Gf\ 20\ s^{-1}\ tf\ 25min\ Rr_4$	1,11	-0,97
$Gf\ 20\ s^{-1}\ tf\ 25min\ Rr_5$	1,08	-1,31
$Gf\ 40\ s^{-1}\ tf\ 5min\ Rr_1$	1,51	-0,21
$Gf\ 40\ s^{-1}\ tf\ 5min\ Rr_2$	1,50	-0,31
$Gf\ 40\ s^{-1}\ tf\ 5min\ Rr_3$	1,47	-0,71
$Gf\ 40\ s^{-1}\ tf\ 5min\ Rr_4$	1,42	-1,27
$Gf\ 40\ s^{-1}\ tf\ 5min\ Rr_5$	1,40	-1,48
$Gf\ 40\ s^{-1}\ tf\ 10min\ Rr_1$	1,43	0,05
$Gf\ 40\ s^{-1}\ tf\ 10min\ Rr_2$	1,43	0,07
$Gf\ 40\ s^{-1}\ tf\ 10min\ Rr_3$	1,41	-0,23
$Gf\ 40\ s^{-1}\ tf\ 10min\ Rr_4$	1,37	-0,60
$Gf\ 40\ s^{-1}\ tf\ 10min\ Rr_5$	1,32	-1,29
$Gf\ 40\ s^{-1}\ tf\ 15min\ Rr_1$	1,65	0,59
$Gf\ 40\ s^{-1}\ tf\ 15min\ Rr_2$	1,63	0,38
$Gf\ 40\ s^{-1}\ tf\ 15min\ Rr_3$	1,62	0,25
$Gf\ 40\ s^{-1}\ tf\ 15min\ Rr_4$	1,59	-0,16
$Gf\ 40\ s^{-1}\ tf\ 15min\ Rr_5$	1,55	-0,62
$Gf\ 40\ s^{-1}\ tf\ 20min\ Rr_1$	1,96	0,75
$Gf\ 40\ s^{-1}\ tf\ 20min\ Rr_2$	1,94	0,54
$Gf\ 40\ s^{-1}\ tf\ 20min\ Rr_3$	1,95	0,63
$Gf\ 40\ s^{-1}\ tf\ 20min\ Rr_4$	1,91	0,13
$Gf\ 40\ s^{-1}\ tf\ 20min\ Rr_5$	1,85	-0,61
$Gf\ 40\ s^{-1}\ tf\ 25min\ Rr_1$	3,19	1,28
$Gf\ 40\ s^{-1}\ tf\ 25min\ Rr_2$	3,19	0,99
$Gf\ 40\ s^{-1}\ tf\ 25min\ Rr_3$	3,19	0,98

$Gf\ 40\ s^{-1}\ tf\ 25min\ Rr_4$	3,17	0,72
$Gf\ 40\ s^{-1}\ tf\ 25min\ Rr_5$	3,12	0,10
$Gf\ 60\ s^{-1}\ tf\ 5min\ Rr_1$	-2,05	-0,16
$Gf\ 60\ s^{-1}\ tf\ 5min\ Rr_2$	-2,05	-0,14
$Gf\ 60\ s^{-1}\ tf\ 5min\ Rr_3$	-2,03	0,11
$Gf\ 60\ s^{-1}\ tf\ 5min\ Rr_4$	-2,07	-0,33
$Gf\ 60\ s^{-1}\ tf\ 5min\ Rr_5$	-2,14	-1,20
$Gf\ 60\ s^{-1}\ tf\ 10min\ Rr_1$	-2,48	0,83
$Gf\ 60\ s^{-1}\ tf\ 10min\ Rr_2$	-2,49	0,68
$Gf\ 60\ s^{-1}\ tf\ 10min\ Rr_3$	-2,50	0,56
$Gf\ 60\ s^{-1}\ tf\ 10min\ Rr_4$	-2,55	-0,12
$Gf\ 60\ s^{-1}\ tf\ 10min\ Rr_5$	-2,61	-0,82
$Gf\ 60\ s^{-1}\ tf\ 15min\ Rr_1$	-1,65	2,87
$Gf\ 60\ s^{-1}\ tf\ 15min\ Rr_2$	-1,70	2,30
$Gf\ 60\ s^{-1}\ tf\ 15min\ Rr_3$	-1,71	2,19
$Gf\ 60\ s^{-1}\ tf\ 15min\ Rr_4$	-1,73	1,84
$Gf\ 60\ s^{-1}\ tf\ 15min\ Rr_5$	-1,79	1,15
$Gf\ 60\ s^{-1}\ tf\ 20min\ Rr_1$	-1,62	2,69
$Gf\ 60\ s^{-1}\ tf\ 20min\ Rr_2$	-1,63	2,59
$Gf\ 60\ s^{-1}\ tf\ 20min\ Rr_3$	-1,63	2,52
$Gf\ 60\ s^{-1}\ tf\ 20min\ Rr_4$	-1,66	2,19
$Gf\ 60\ s^{-1}\ tf\ 20min\ Rr_5$	-1,74	1,21
$Gf\ 60\ s^{-1}\ tf\ 25min\ Rr_1$	0,32	2,10
$Gf\ 60\ s^{-1}\ tf\ 25min\ Rr_2$	0,32	2,07
$Gf\ 60\ s^{-1}\ tf\ 25min\ Rr_3$	0,30	1,91
$Gf\ 60\ s^{-1}\ tf\ 25min\ Rr_4$	0,28	1,58
$Gf\ 60\ s^{-1}\ tf\ 25min\ Rr_5$	0,21	0,78
$Gf\ 80\ s^{-1}\ tf\ 5min\ Rr_1$	-1,00	0,19
$Gf\ 80\ s^{-1}\ tf\ 5min\ Rr_2$	-1,02	-0,10
$Gf\ 80\ s^{-1}\ tf\ 5min\ Rr_3$	-1,05	-0,42
$Gf\ 80\ s^{-1}\ tf\ 5min\ Rr_4$	-1,09	-0,91
$Gf\ 80\ s^{-1}\ tf\ 5min\ Rr_5$	-1,14	-1,50
$Gf\ 80\ s^{-1}\ tf\ 10min\ Rr_1$	-0,14	0,03
$Gf\ 80\ s^{-1}\ tf\ 10min\ Rr_2$	-0,16	-0,27
$Gf\ 80\ s^{-1}\ tf\ 10min\ Rr_3$	-0,20	-0,67
$Gf\ 80\ s^{-1}\ tf\ 10min\ Rr_4$	-0,23	-1,10

$Gf\ 80\ s^{-1}$ tf 10min Rr_5	-0,30	-1,96
$Gf\ 80\ s^{-1}$ tf 15min Rr_1	-0,23	0,30
$Gf\ 80\ s^{-1}$ tf 15min Rr_2	-0,28	-0,27
$Gf\ 80\ s^{-1}$ tf 15min Rr_3	-0,29	-0,38
$Gf\ 80\ s^{-1}$ tf 15min Rr_4	-0,33	-0,91
$Gf\ 80\ s^{-1}$ tf 15min Rr_5	-0,33	-0,91
$Gf\ 80\ s^{-1}$ tf 20min Rr_1	-0,33	0,72
$Gf\ 80\ s^{-1}$ tf 20min Rr_2	0,19	0,47
$Gf\ 80\ s^{-1}$ tf 20min Rr_3	0,18	0,47
$Gf\ 80\ s^{-1}$ tf 20min Rr_4	0,15	-0,05
$Gf\ 80\ s^{-1}$ tf 20min Rr_5	0,07	-1,05
$Gf\ 80\ s^{-1}$ tf 25min Rr_1	1,05	1,15
$Gf\ 80\ s^{-1}$ tf 25min Rr_2	1,04	1,09
$Gf\ 80\ s^{-1}$ tf 25min Rr_3	1,03	0,98
$Gf\ 80\ s^{-1}$ tf 25min Rr_4	1,04	1,09
$Gf\ 80\ s^{-1}$ tf 25min Rr_5	0,97	0,19

A relação descrita na Tabela 10 foi plotada em forma de gráfico (Figura 10) através das coordenadas dos indivíduos.

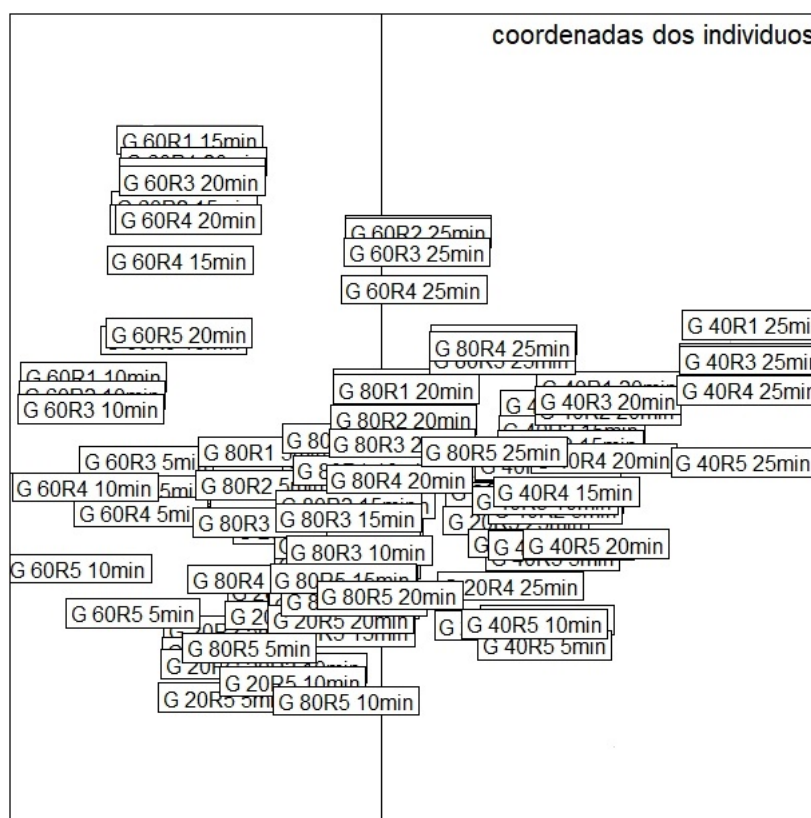


Figura 10. Gráfico das coordenadas dos indivíduos correspondentes as CP1 e CP2 para a condição de análise 1.

A ACP fez agrupamento de indivíduos através da mensuração de suas similaridades referentes às variáveis observadas em sistema de coordenadas independentes (determinado pelas duas primeiras componentes principais, CP1 e CP2).

Ou seja, essa análise permitiu o agrupamento dos indivíduos analisados de acordo com sua variância, segundo seu comportamento dentro da população, representado pela variação do conjunto de características que define o indivíduo dentro da amostra.

Os gráficos da Figura 9 e Figura 10 foram colocados lado a lado para permitir uma comparação.

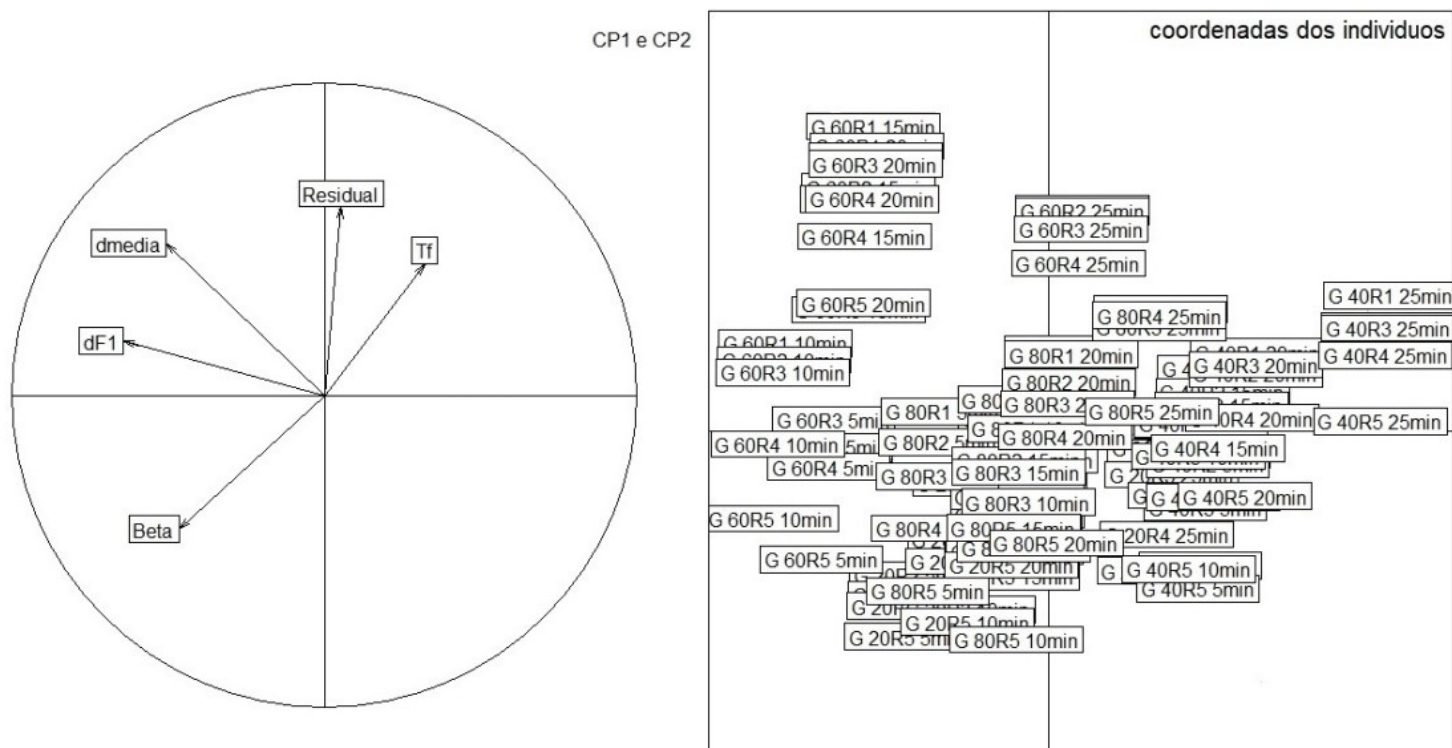


Figura 11. Comparação gráficos círculo das correlações e coordenadas dos indivíduos para as CP1 e CP2.

A partir da comparação desses dois gráficos (Figura 11) foi possível perceber que o Tempo de Floculação influenciou mais no gradiente de agitação de 40 s^{-1} , isso implica que em agitação de 40 s^{-1} o tempo de floculação foi determinante.

O gradiente de agitação de 60 s^{-1} influenciou mais as variáveis de Residual Remanescente, média dos diâmetros e Dimensão de Fractal, ou seja, nessa velocidade de agitação o Residual Remanescente de cor na amostra, a forma e tamanho dos flocos formados foram mais afetados para essa condição.

Já o gradiente de agitação de 20 s^{-1} e 80 s^{-1} caracterizou mais o parâmetro Beta (β), ou seja, os extremos de velocidade de agitação (muito lenta ou muito rápida) determinaram a proporção de tamanho dos flocos presentes na amostra, pois Beta (β) é o parâmetro representativo da função contínua de tamanho dos flocos, e quanto maior seu valor em módulo, maior a quantidade de pequenos flocos na amostra, o que acarreta menor eficiência de separação sólido/líquido.

5.3 Sedimentação para água preparada com caulinita e coagulada com Sulfato de Alumínio (Condição de análise 2)

5.3.1 Correlação

A Tabela 11 mostra a análise de correlação obtida para a condição de análise 2.

Tabela 11. Matriz de correlação dos dados de Sedimentação com água preparada com caulinita e coagulada com Sulfato de Alumínio obtida através do Rstudio®.

	Tf	β	Df	dmédia	Residual Remanescente
Tf	1,00	0,16	-0,22	-0,10	0,08
β	0,16	1,00	-0,64	-0,40	0,13
Df	-0,22	-0,64	1,00	0,88	-0,42
dmédia	-0,10	-0,40	0,88	1,00	-0,49
Residual	0,08	0,13	-0,42	-0,49	1,00

Baseado na discussão anteriormente sobre correlação e na observação dos valores dispostos na Tabela 11 é possível afirmar que os dados utilizados para gerar essa análise possuem correlação.

Devemos considerar também que quanto maior o valor numérico em módulo associado às variáveis, mais alto é o valor da correlação.

A partir desse pressuposto foi utilizado o método de ACP para análise dos conjunto de dados.

5.3.2 Componentes Principais

Na Tabela 12 estão apresentadas as Componentes Principais obtidas pela análise de ACP para a condição 2.

Tabela 12. Componentes Principais obtidos pela ACP no RStudio® a partir da rotação Rotação (n x k) = (5 x 5).

Componentes Principais	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
<i>Tf</i>	0,17	-0,83	-0,53	-0,05	0,08
<i>β</i>	0,42	-0,29	0,58	0,59	0,25
<i>Df</i>	-0,59	0,02	-0,14	0,26	0,75
dmédia	-0,55	-0,22	0,02	0,53	-0,61
Residual Remanescente	0,37	0,43	-0,61	0,56	-0,02

As variáveis descritas como CP1, CP2, CP3 e CP4 são as 5 Componentes Principais obtidas para essa análise, entretanto, foram utilizadas apenas as que mais representam a massa de dados.

Na Tabela 13 é possível observar o desvio padrão, a proporção de variação e a proporção acumulada de cada CP.

Tabela 13. Importância dos Componentes Principais em ordem decrescente.

Componentes Principais	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Desvio padrão	1,61	1,00	0,93	0,69	0,26
Proporção de variância	0,52	0,20	0,17	0,09	0,01
Proporção acumulada	0,52	0,72	0,89	0,99	1,00

A partir do desvio padrão foi calculada a variância de cada Componente Principal, apresentadas na Tabela 14.

Baseado no critério de Kaiser foi possível definir que as Componentes Principais CP1 e CP2 explicam maior porcentagem significativa dos dados originais e essas foram utilizadas para análise da condição de estudo 2.

Tabela 14. Variância dos CP's de cada variável.

Componentes Principais	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Variâncias	2,60	1,00	0,86	0,47	0,07

Pela análise da Tabela 14 podemos perceber que a somatória das variâncias resulta em valor igual a 5, que equivale a 100% da variação dos dados, portanto o valor da CP1 com 2,60 de variância explica 52% dos dados, enquanto a CP2 com 1,00 de variância explica 20% dos dados e, portanto, juntas elas explicam 72% da variação total dos dados, o que, nesse estudo, é suficiente para a representação dos dados originais.

Sendo assim, as componentes principais que mais explicam a variabilidade dos dados são a CP1 e CP2. Estas foram selecionados para uma análise mais aprofundada (Tabela 15).

Tabela 15. Componente Principal 1 e 2.

	CP1	CP2
<i>Tf</i>	0,17	-0,83
<i>β</i>	0,42	-0,29
<i>Df</i>	-0,59	0,02
dmédia	-0,55	-0,22
Residual Remanescente	0,37	0,43

É possível observar a partir da Tabela 15 que a Componente Principal 1 possui maiores valores em módulo para as variáveis *Df* e *dmédia* isso significa que a CP1 explica melhor as variáveis de Dimensão de Fractal e média dos diâmetros.

A Componente Principal 2 possui maior valor em módulo para a variável *tf*, isso significa que a CP2 explica melhor a variável de Tempo de Floculação.

Na Figura 12 está representado o círculo das correlações entre as CP1 e CP2 para essa condição de análise.

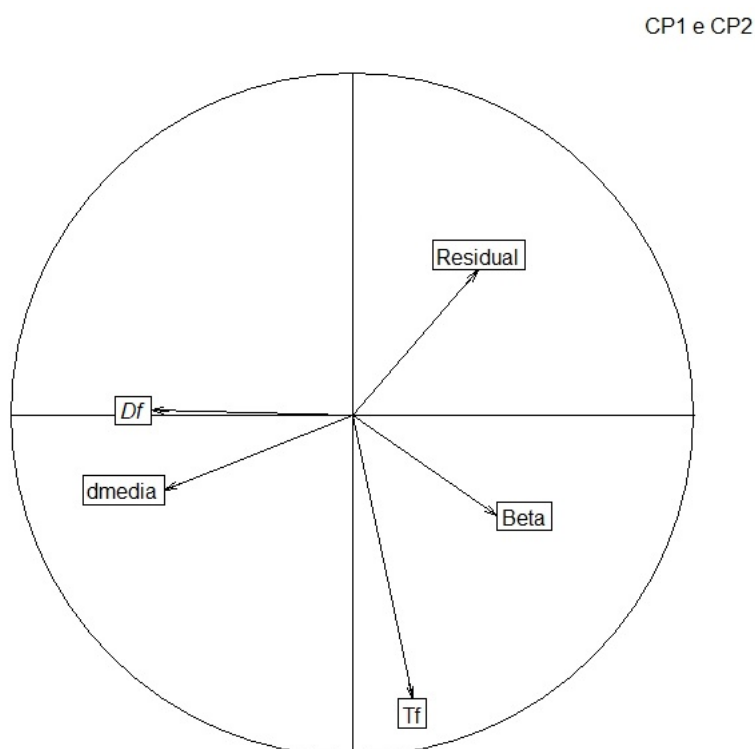


Figura 12. Gráfico círculo das correlações entre CP1 e CP2 para a condição de análise 2.

A CP1 foi plotada no eixo das abcissas, e a CP2 no eixo das ordenadas. Com essas informações é possível depreender do gráfico que a CP1 explica melhor as variáveis de Dimensão de Fractal e média dos diâmetros. Enquanto a CP2 explica melhor a variável de Tempo de Floculação. Essas mesmas conclusões foram obtidas a partir da análise interpretativa dos dados numéricos das CP1 e CP2 (Tabela 15).

Como as CP1 e CP2 explicam juntas 72% dos dados, ou seja, massa mais expressiva dos dados, isso significa que para a Sedimentação Gravitacional com água preparada com Caulinita coagulada com Sulfato de Alumínio (condição 2), as

variáveis mais determinantes foram a Dimensão de Fractal, a média dos diâmetros e o Tempo de floculação.

Ou seja, essa condição de estudo foi caracterizada em sua maioria através da morfologia e diâmetro médio dos flocos formados caracterizados pelos Tempos de Floculação. Isso implica que a forma e tamanho dos flocos foram determinados principalmente pelo Tempo de Floculação, para essa condição.

É importante evidenciar também que a CP1 obteve correlação mais alta com a Dimensão de Fractal, isso indica que a morfologia dos flocos formados foi a característica mais determinante para essa condição de processo de remoção por Sedimentação com água preparada com Caulinita e coagulada com Sulfato de Alumínio.

A Figura 13 mostra as coordenadas dos indivíduos plotada em forma de gráfico.

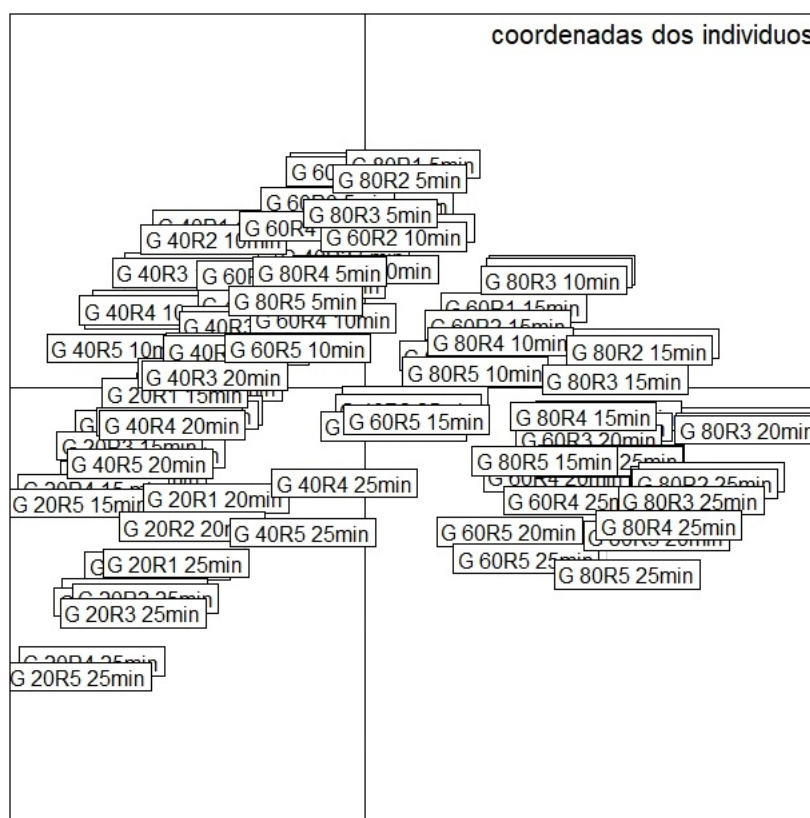


Figura 13. Gráfico das coordenadas dos indivíduos correspondentes às CP1 e CP2 para a condição de análise 2.

A ACP realizou o agrupamento dos indivíduos analisados através da sua variância, isso permitiu uma interpretação visual relacionando os indivíduos às variáveis estudadas.

Na Figura 14 podemos observar o gráfico de círculo e o gráfico de indivíduos lado a lado, através dessa comparação podemos obter resultados em relação a condição investigada.

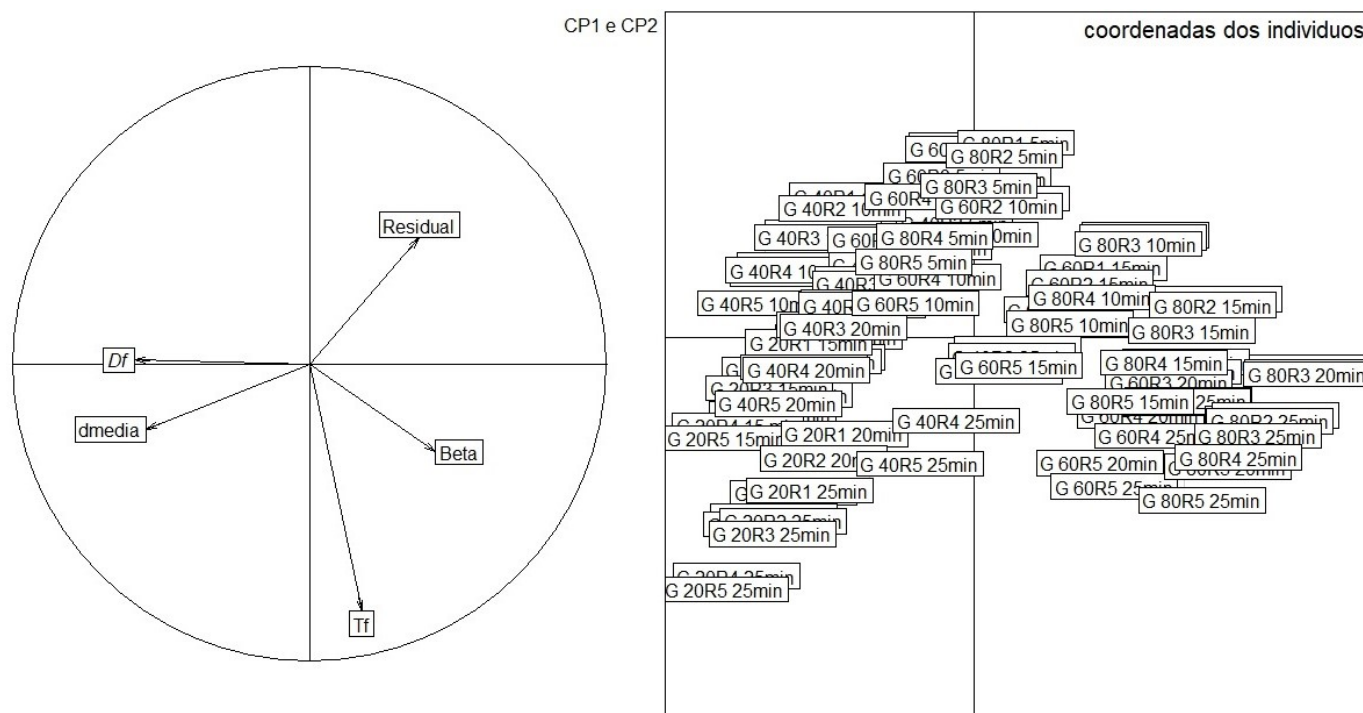


Figura 14. Comparação gráficos círculo das correlações e coordenadas dos indivíduos para as CP1 e CP2 na condição de análise 2.

A partir dessa comparação (Figura 14) é possível perceber que o gradiente de agitação de 40 s^{-1} influenciou mais na Df , isso significa que essa agitação caracterizou principalmente a Dimensão de Fractal.

O gradiente de agitação de 60 s^{-1} e 80 s^{-1} influenciou mais as variáveis de Tempo de Floculação, Beta e Residual Remanescente, ou seja, influenciou mais na duração do tempo em que a formação de flocos ocorre, na distribuição de tamanho dos flocos formados, e no Residual Remanescente de turbidez das amostras para a condição 2.

Já o gradiente de agitação de 20 s^{-1} influenciou mais na variável $d_{\text{média}}$, ou seja, média dos diâmetros. Isso significa que essa velocidade de agitação caracterizou mais sobre a distribuição de tamanho dos flocos formados durante essa condição.

5.4 Flotação para água preparada com ácido húmico e coagualada com Sulfato de Alumínio (Condição de análise 3)

5.4.1 Correlação

Para essa condição não foi possível obter uma matriz de correlação no Software R[®] pois os dados não demonstram correlação entre si.

Por esse motivo não foi dada continuidade ao estudo de ACP dos resultados para a condição de Flotação para água preparada com ácido húmico e coagualada com Sulfato de Alumínio.

5.5 Flotação para água preparada com caulinita e coagualada com Sulfato de Alumínio (Condição de análise 4)

5.5.1 Correlação

Para essa condição não foi possível obter uma matriz de correlação no Software R[®] pois os dados não demonstram correlação entre si.

Por esse motivo não foi dada continuidade ao estudo de ACP dos resultados para a condição de Flotação para água preparada com caulinita e coagualada com Sulfato de Alumínio.

5.6 Sedimentação para água preparada com ácido húmico e coagualada com Cloreto Férrico (Condição de análise 5)

5.6.1 Correlação

A Tabela 16 mostra a análise de correlação obtida para a condição de análise 5.

Tabela 16. Matriz de correlação dos dados de Sedimentação com água preparada com caulinita e coagualada com Sulfato de Alumínio obtida através do Rstudio[®].

	<i>Tf</i>	β	<i>Df</i>	dmédia	Residual Remanescente
<i>Tf</i>	1,00	0,10	0,09	0,00	0,24
β	0,10	1,00	-0,60	0,26	-0,07
<i>Df</i>	0,09	-0,60	1,00	0,77	-0,09
dmédia	0,00	-0,26	0,77	1,00	-0,36
Residual	0,24	-0,07	-0,09	-0,36	1,00

A partir de alguns valores (maiores valores em módulos) dispostos na Tabela 16 podemos verificar que os dados são correlacionados entre si, portanto foi possível aplicar a ACP para essa condição de análise.

5.6.2 Componentes Principais

Na Tabela 17 estão apresentadas as Componentes Principais obtidas pela análise de ACP para a condição 5.

Tabela 17. Componentes Principais obtidos pela ACP no RStudio® a partir da rotação Rotação (n x k) = (5 x 5).

Componentes Principais	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
<i>Tf</i>	0,03	0,60	0,69	0,40	0,08
β	0,45	-0,27	0,57	-0,54	-0,33
<i>Df</i>	-0,64	0,20	0,03	-0,15	-0,73
dmédia	-0,59	-0,13	0,32	-0,44	0,59
Residual Remanescente	0,21	0,72	-0,31	-0,58	0,11

As variáveis descritas como CP1, CP2, CP3 e CP4 são as 5 Componentes Principais obtidas para essa análise, entretanto, foram utilizadas apenas as que mais representam a massa de dados.

Na Tabela 18 é possível observar o desvio padrão, a proporção de variação e a proporção acumulada de cada CP.

Tabela 18. Importância dos Componentes Principais em ordem decrescente.

Componentes Principais	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Desvio padrão	1,47	1,13	0,99	0,69	0,33
Proporção de variância	0,43	0,25	0,20	0,09	0,02
Proporção acumulada	0,43	0,69	0,88	0,98	1,00

O valor de desvio padrão foi utilizado para calcular a variância para cada CP, objetivando selecionar as CP's mais importantes para a representatividade da massa estudada.

A Tabela 19 apresenta a variância calculada para cada CP. A partir do critério de Kaiser foi possível definir que as Componentes Principais CP1 e CP2 explicam maior porcentagem significativa dos dados originais e, portanto, foram utilizadas para análise da condição de estudo 5.

Tabela 19. Variância dos CP's de cada variável.

Componentes Principais	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Variâncias	2,16	1,27	0,98	0,47	0,11

Pela análise da Tabela 19 podemos perceber que a somatória das variâncias resulta em valor igual a 5, que equivale a 100% da variação dos dados, portanto o valor da CP1 com 2,16 de variância explica 43,2% dos dados, enquanto a CP2 com 1,27 de variância explica 25,4% dos dados e, portanto, juntas elas explicam 68,6% da variação total dos dados, o que, nesse estudo, é suficiente para a representação dos dados originais.

Sendo assim, as componentes principais que mais explicam a variabilidade dos dados são a CP1 e CP2 (Tabela 20). Estas foram selecionados para uma análise mais detalhada.

Tabela 20. Componente Principal 1 e 2.

	CP1	CP2
<i>Tf</i>	0,03	0,60
β	0,45	-0,27
<i>Df</i>	-0,64	0,20
dmédia	-0,59	-0,13
Residual Remanescente	0,21	0,72

Podemos verificar a partir da Tabela 20 que a Componente Principal 1 possui maiores valores em módulo para as variáveis *Df* e dmédia isso significa que a CP1 explica melhor as variáveis de Dimensão de Fractal e média dos diâmetros.

A Componente Principal 2 possui maior valor em módulo para a variável Residual Remanescente e *tf*, isso significa que a CP2 explica melhor as variáveis Residual Remanescente de cor e Tempo de Floculação.

Na Figura 15 podemos observar o círculo das correlações entre as CP1 e CP2.

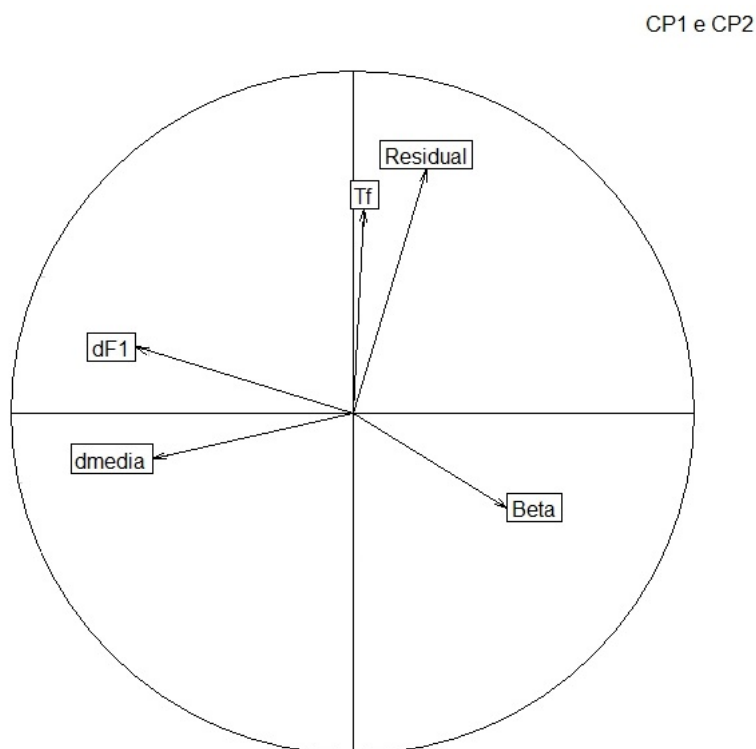


Figura 15. Gráfico círculo das correlações entre CP1 e CP2 para a condição de análise 5.

A CP1 foi plotada no eixo das abcissas, e a CP2 no eixo das ordenadas. Com essas informações é possível depreender do gráfico que a CP1 explica melhor as variáveis de Dimensão de Fractal e média dos diâmetros. Enquanto a CP2 explica melhor a variável de Tempo de Floculação e Residual Remanescente. Essas mesmas conclusões foram obtidas a partir da análise interpretativa dos dados numéricos das CP1 e CP2 (Tabela 20).

Como as CP1 e CP2 explicam juntas 68,6% dos dados, ou seja, massa mais expressiva dos dados, isso significa que para a Sedimentação Gravitacional com água preparada com ácido húmico coagulada com Cloreto Férrico (condição 5), as variáveis mais determinantes foram a Dimensão de Fractal, a média dos diâmetros, Tempo de floculação e Residual Remanescente de cor.

Ou seja, essa condição de estudo foi caracterizada em sua maioria através da morfologia e diâmetro médio dos flocos formados influenciados pelos Tempos de Floculação resultando em Residuais Remanescentes. Isso implica que o conjunto de variáveis que representam a forma, o tamanho dos flocos, o Residual Remanescente de cor e o Tempo de Floculação receberam grande influência para essa condição de análise.

É importante evidenciar também que a CP1 obteve correlação mais alta com a Dimensão de Fractal, isso indica que a morfologia dos flocos formados foi determinante para essa condição de processo de remoção por Sedimentação com água preparada com ácido húmico e coagulada com Cloreto Férrico.

A Figura 16 mostra as coordenadas dos indivíduos plotada em forma de gráfico.

A partir do agrupamento dos indivíduos através da sua variância, foi possível plotar o gráfico de indivíduos, evidenciando o comportamento de cada um dentro da população amostral.

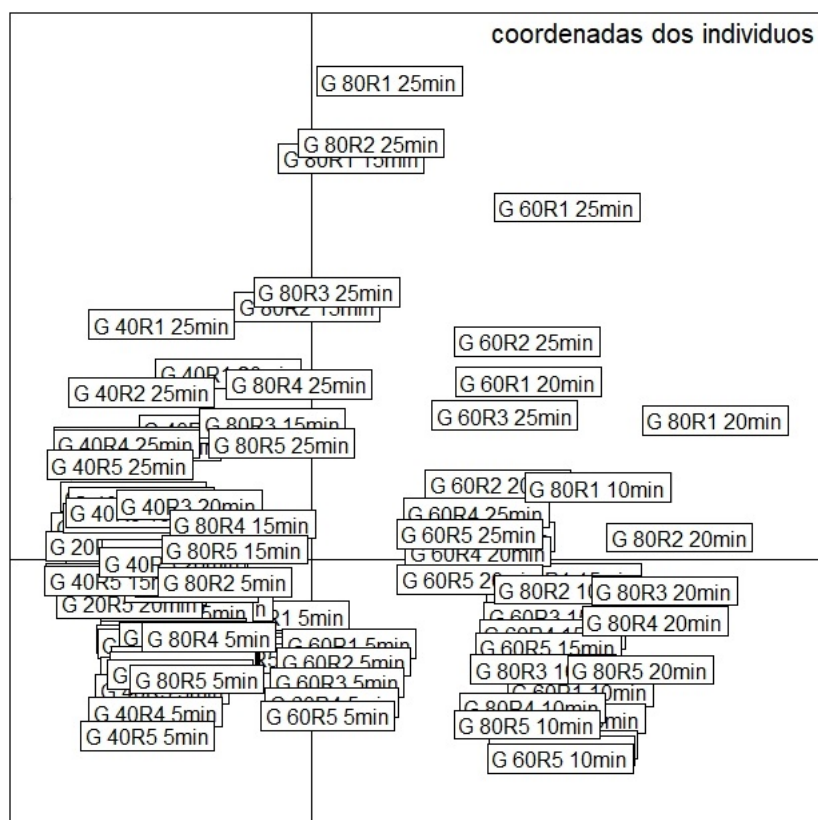


Figura 16. Gráfico das coordenadas dos indivíduos correspondentes às CP1 e CP2 para a condição de análise 5.

Na Figura 17 vemos o gráfico de círculo e o gráfico de indivíduos lado a lado, através dessa comparação podemos obter resultados em relação a condição investigada.

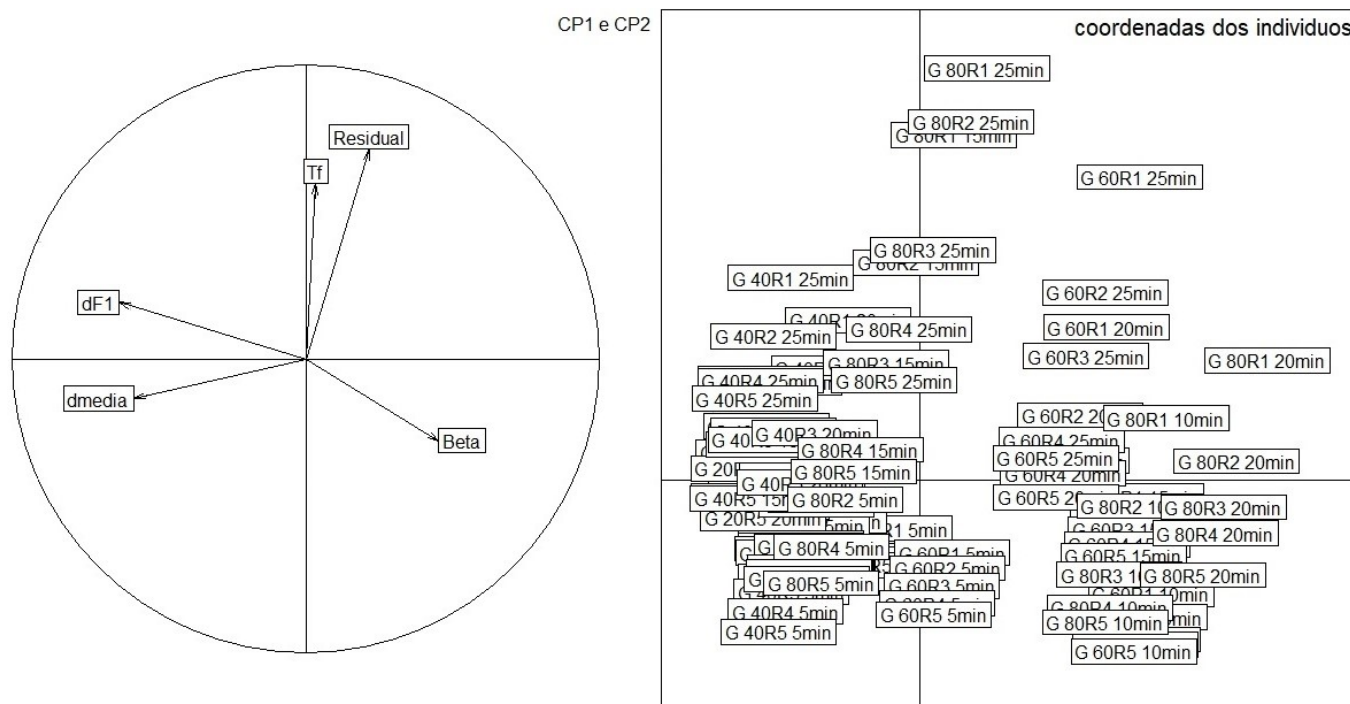


Figura 17. Comparação gráficos círculo das correlações e coordenadas dos indivíduos para as CP1 e CP2 na condição de análise 5.

A partir dessa comparação é possível perceber que o gradiente de agitação de 20 s^{-1} , 40 s^{-1} e 80 s^{-1} influenciaram mais na Df e $dmedia$, isso significa que essas velocidades de agitação interferem principalmente a Dimensão de Fractal e a média dos diâmetros analisados para essa condição.

O gradiente de agitação de 60 s^{-1} e 80 s^{-1} caracterizaram mais as variáveis $Beta$ (β), Tempo de Floculação, Residual Remanescente, ou seja, influenciaram mais na duração do tempo em que a formação de flocos ocorre, na distribuição de tamanho dos flocos formados, e no Residual Remanescente de cor das amostras para a condição 5.

5.7 Sedimentação para água preparada com caulinita e coagulada com Cloreto Férrico (Condição de análise 6)

5.7.1 Correlação

A Tabela 21 mostra a análise de correlação obtida para a condição de análise 6.

Tabela 21. Matriz de correlação dos dados de Sedimentação com água preparada com caulinita e coagulada com Cloreto Férrico obtida através do Rstudio®.

	Tf	β	Df	dmédia	Residual Remanescente
Tf	1,00	0,30	-0,14	-0,14	-0,23
β	0,30	1,00	0,30	0,58	-0,29
Df	-0,14	0,30	1,00	0,64	0,00
dmédia	-0,14	0,58	0,64	1,00	-0,36
Residual	-0,23	-0,29	0,00	-0,36	1,00

Observando a Tabela 21 é possível verificar que os dados são correlacionados entre si, por esse motivo foi possível aplicar a ACP para essa condição.

5.7.2 Componentes Principais

Na Tabela 22 estão apresentadas as Componentes Principais obtidas pela análise de ACP para a condição 6.

Tabela 22. Componentes Principais obtidos pela ACP no RStudio® a partir da rotação Rotação (n x k) = (5 x 5).

Componentes Principais	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Tf	0,07	-0,72	0,48	-0,40	0,29
β	0,53	-0,25	0,31	0,63	-0,40
Df	0,47	0,43	0,29	-0,61	-0,38
dmédia	0,62	0,21	-0,14	0,10	0,74
Residual Remanescente	-0,34	0,43	0,75	0,25	0,26

Visando selecionar apenas as CP's que representam a maioria da massa de dados, sem perder as características dos mesmos foi obtido o desvio padrão para cada CP e posteriormente foi calculada a variância.

Na Tabela 23 está demonstrado o desvio padrão, a proporção de variação e a proporção acumulada de cada CP.

Tabela 23. Importância dos Componentes Principais em ordem decrescente.

Componentes Principais	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Desvio padrão	1,47	1,17	0,89	0,70	0,42
Proporção de variância	0,43	0,27	0,16	0,10	0,04
Proporção acumulada	0,43	0,71	0,87	0,96	1,00

A Tabela 24 apresenta a variância calculada para cada CP. A partir do critério de Kaiser foi possível definir que as Componentes Principais CP1 e CP2 explicam maior porcentagem significativa dos dados originais e foram utilizadas para análise da condição de estudo 6.

Tabela 24. Variância dos CP's de cada variável.

Componentes Principais	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Variâncias	2,17	1,36	0,80	0,49	0,18

Pela análise da Tabela 24 podemos perceber que a somatória das variâncias resulta em valor igual a 5, que equivale a 100% da variação dos dados, portanto o valor da CP1 com 2,17 de variância explica 43,4% dos dados, enquanto a CP2 com 1,36 de variância explica 27,2% dos dados e, portanto, juntas elas explicam 70,6% da variação total dos dados, o que, nesse estudo, é suficiente para a representação dos dados originais.

Sendo assim, as componentes principais que mais explicam a variabilidade dos dados são a CP1 e CP2. Estas foram selecionadas para uma análise mais aprofundada (Tabela 25).

Tabela 25. Componente Principal 1 e 2.

	CP1	CP2
Tf	0,07	-0,72
β	0,53	-0,25
Df	0,47	0,43
dmédia	0,62	0,21
Residual Remanescente	-0,34	0,43

Podemos verificar a partir da Tabela 25 que a Componente Principal 1 possui maiores valores em módulo para as variáveis $dmédia$ e β , isso significa que a CP1 explica melhor as variáveis de média dos diâmetros e parâmetro representativo da função de tamanho dos flocos.

A CP2 possui valores significativos de correlação com a variável de Tempo de Floculação.

Na Figura 18 podemos observar o círculo das correlações entre as CP1 e CP2.

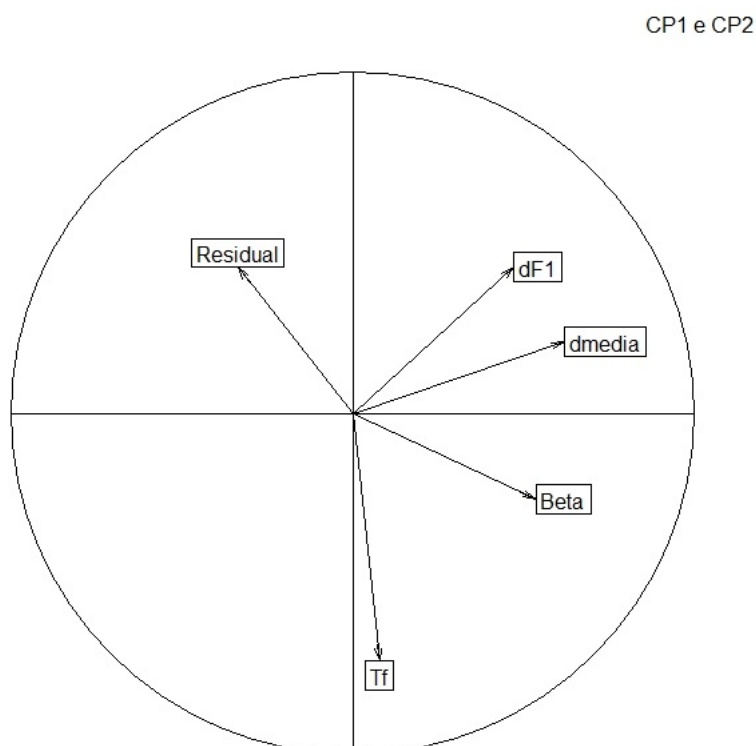


Figura 18. Gráfico círculo das correlações entre CP1 e CP2 para a condição de análise 6.

A CP1 foi plotada no eixo das abcissas, e a CP2 no eixo das ordenadas. Com essas informações é possível depreender do gráfico que para essa condição de estudo a CP1 representou melhor as variáveis de média dos diâmetros e β . Enquanto a CP2 explicou melhor a variável de Tempo de Floculação. Essas mesmas conclusões foram obtidas a partir da análise interpretativa dos dados numéricos das CP1 e CP2 (Tabela 26).

Como as CP1 e CP2 representam juntas 70,6% dos dados, ou seja, massa mais expressiva dos dados, isso significa que, para a Sedimentação Gravitacional com água preparada com caulinita coagulada com Cloreto Férrico (condição 6), as variáveis mais determinantes foram a média dos diâmetros, parâmetro de tamanho dos flocos, e Tempo de floculação.

Ou seja, essa condição de estudo foi caracterizada em sua maioria através do diâmetro médio e tamanho dos flocos formados influenciados pelos Tempos de Floculação. Isso implica que o tamanho dos flocos foi determinado principalmente pelo Tempo de Floculação, para essa condição.

É importante evidenciar também que a CP1 obteve correlação mais alta com $\bar{d}_m$, isso indica essa condição influenciou principalmente o tamanho em geral dos flocos formados.

A Figura 19 mostra as coordenadas dos indivíduos plotada em forma de gráfico.

A ACP permitiu o agrupamento dos indivíduos analisados através de sua variância, por meio dessa análise foi possível plotar o gráfico da Figura 19.

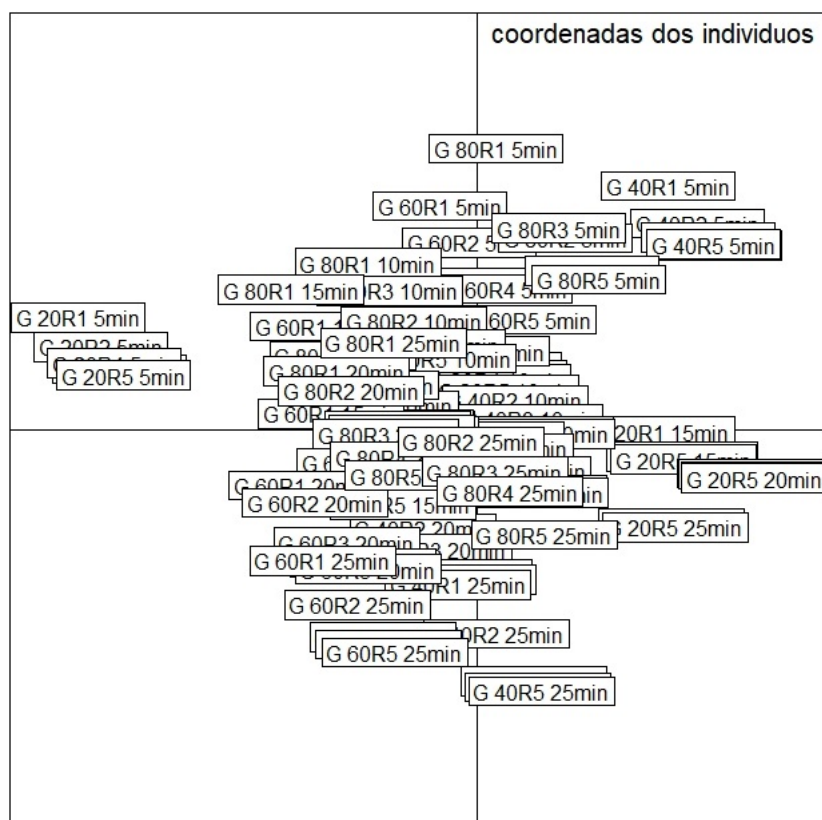


Figura 19. Gráfico das coordenadas dos indivíduos correspondentes às CP1 e CP2 para a condição de análise 6.

Na Figura 20 vemos o gráfico de círculo e o gráfico de indivíduos lado a lado, através dessa comparação podemos obter resultados em relação a condição investigada.

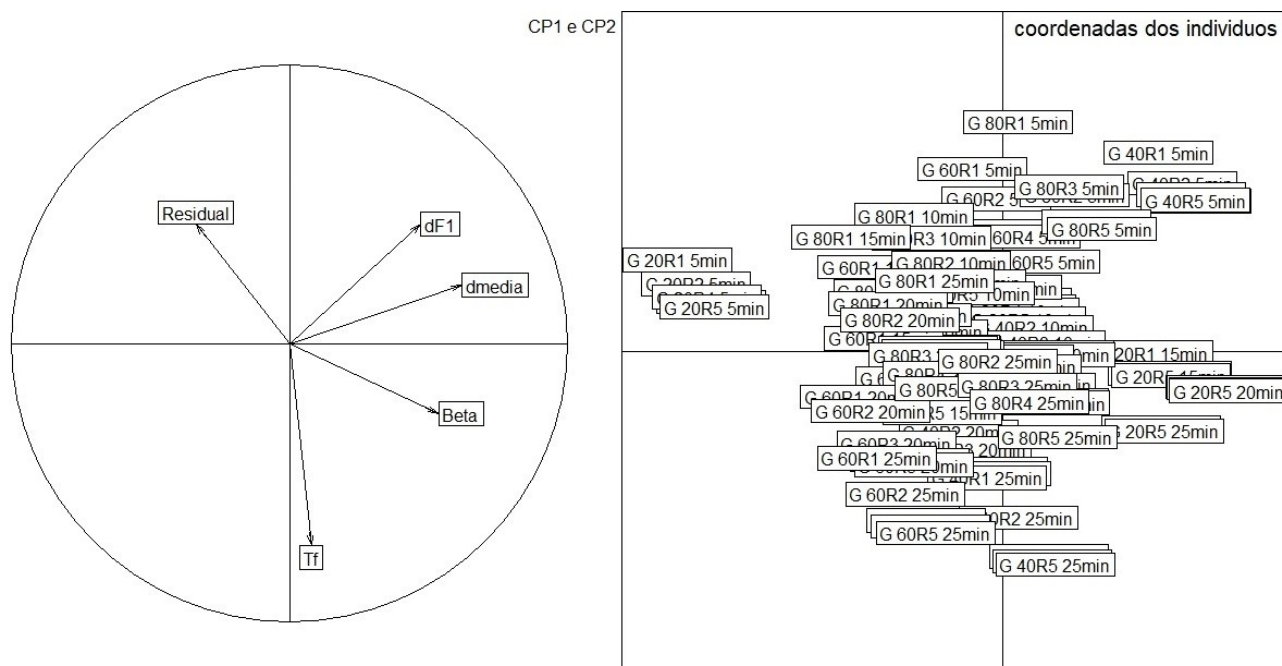


Figura 20. Comparação gráficos círculo das correlações e coordenadas dos indivíduos para as CP1 e CP2 na condição de análise 6.

A partir da comparação desses gráficos foi possível perceber que o gradiente de agitação de 20 s^{-1} e 80 s^{-1} influenciaram mais nas variáveis Beta e Residual Remanescente, ou seja, na distribuição de tamanho dos flocos formados e no Residual de turbidez.

5.8 Flotação para água preparada com ácido húmico e coagulada com Cloreto Férrico (Condição de análise 7)

5.8.1 Correlação

A Tabela 27 mostra a análise de correlação obtida para a condição de análise 7.

	<i>Tf</i>	β	<i>Df</i>	dmédia	Residual Remanescente
<i>Tf</i>	1,00	0,10	-0,26	-0,08	0,17
β	0,10	1,00	-0,11	-0,17	0,01
<i>Df</i>	-0,26	-0,11	1,00	0,80	-0,38
dmédia	-0,08	-0,17	0,80	1,00	-0,39
Residual	0,17	0,01	-0,38	-0,39	1,00

Tabela 27. Matriz de correlação dos dados de Flotação com água preparada com ácido húmico e coagulada com Cloreto Férrico obtida através do Rstudio®.

Baseado nos valores em módulo apresentados acima é possível afirmar que os dados são correlacionados entre si, e portanto aplicou-se foi a ACP para essa condição de análise.

5.8.2 Componentes Principais

Na Tabela 28 são apresentadas as Componentes Principais obtidas pela análise de ACP para a condição 7.

Tabela 28. Componentes Principais obtidos pela ACP no RStudio® a partir da rotação Rotação (n x k) = (5 x 5).

Componentes Principais	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
<i>Tf</i>	0,25	-0,46	0,81	-0,20	-0,17
<i>β</i>	0,17	-0,83	-0,44	0,28	0,07
<i>Df</i>	-0,61	-0,10	0,08	0,36	-0,70
dmédia	-0,59	-0,14	0,31	0,23	0,69
Residual Remanescente	0,43	0,25	0,22	0,84	0,04

Foram selecionadas as CP's com maior representatividade da massa total de dados utilizando o desvio padrão, variância e o critério de Kaiser.

Na Tabela 29 é possível observar o desvio padrão, a proporção de variação e a proporção acumulada de cada CP, utilizados para selecionar as CP's relevantes.

Tabela 20. Importância dos Componentes Principais em ordem decrescente.

Componentes Principais	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Desvio padrão	1,48	1,01	0,97	0,83	0,42
Proporção de variância	0,44	0,20	0,19	0,14	0,03
Proporção acumulada	0,44	0,64	0,83	0,97	1,00

A Tabela 30 apresenta a variância calculada para cada CP. A partir do critério de Kaiser foi possível definir que as Componentes Principais CP1 e CP2 explicam maior porcentagem significativa dos dados originais e serão utilizadas para análise da condição de estudo 7.

Tabela 30. Variância dos CP's de cada variável.

Componentes Principais	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Variâncias	2,18	1,01	0,94	0,70	0,17

Pela análise da Tabela 30 podemos perceber que a somatória das variâncias resulta em valor igual a 5, que equivale a 100% da variação dos dados, portanto o

valor da CP1 com 2,18 de variância explica 43,6% dos dados, enquanto a CP2 com 1,01 de variância explica 20,2% dos dados e, portanto, juntas elas explicam 63,8% da variação total dos dados, o que, nesse estudo, é suficiente para a representação dos dados originais.

Sendo assim, as componentes principais que mais explicam a variabilidade dos dados são a CP1 e CP2 (Tabela 31). Estas foram selecionadas para maior uma análise.

Tabela 31. Componente Principal 1 e 2.

	CP1	CP2
Tf	0,25	-0,46
β	0,17	-0,83
Df	-0,61	-0,10
dmédia	-0,59	-0,14
Residual Remanescente	0,43	0,25

Podemos verificar a partir da Tabela 31 que a Componente Principal 1 possui maiores valores em módulo para as variáveis Df e $dmédia$ isso significa que a CP1 explica melhor as variáveis de Dimensão de Fractal e média dos diâmetros.

A Componente Principal 2 possui maior valor em módulo para a variável β , isso significa que para a condição de análise 7, a CP2 explica melhor o parâmetro representativo da função contínua de distribuição de tamanho dos flocos.

Na Figura 21 podemos observar o círculo das correlações entre as CP1 e CP2.

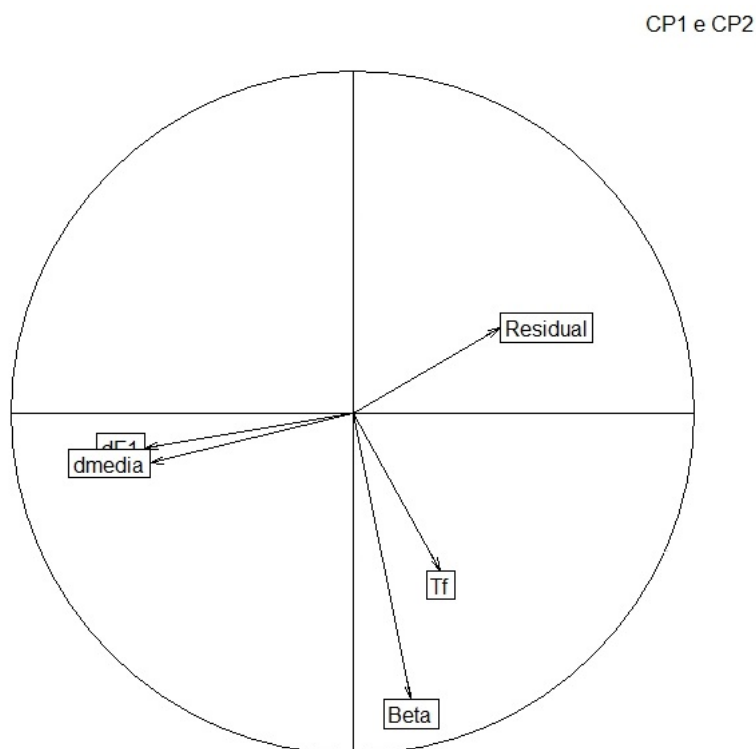


Figura 21. Gráfico círculo das correlações entre CP1 e CP2 para a condição de análise 7.

A CP1 foi plotada no eixo das abcissas, e a CP2 no eixo das ordenadas. Com essas informações é possível depreender do gráfico que a CP1 explica melhor as variáveis de Dimensão de Fractal e média dos diâmetros. Enquanto a CP2 explica melhor a variável de Beta. Essas mesmas conclusões foram obtidas a partir da análise interpretativa dos dados numéricos das CP1 e CP2 (Tabela 31).

Como as CP1 e CP2 explicam juntas 63,8% dos dados, ou seja, massa mais expressiva dos dados, isso significa que para a Flotação com água preparada com ácido húmico coagulada com Cloreto Férrico (condição 7), as variáveis mais determinantes foram a Dimensão de Fractal, a média dos diâmetros e parâmetro representativo β .

Ou seja, essa condição de estudo foi caracterizada em sua maioria através da morfologia e diâmetro dos flocos formados. Isso implica que a forma e o tamanho dos flocos foram os parâmetros mais importantes para essa condição.

É importante evidenciar também que a CP1 obteve correlação mais alta com a Dimensão de Fractal, isso indica que a morfologia dos flocos formados foi

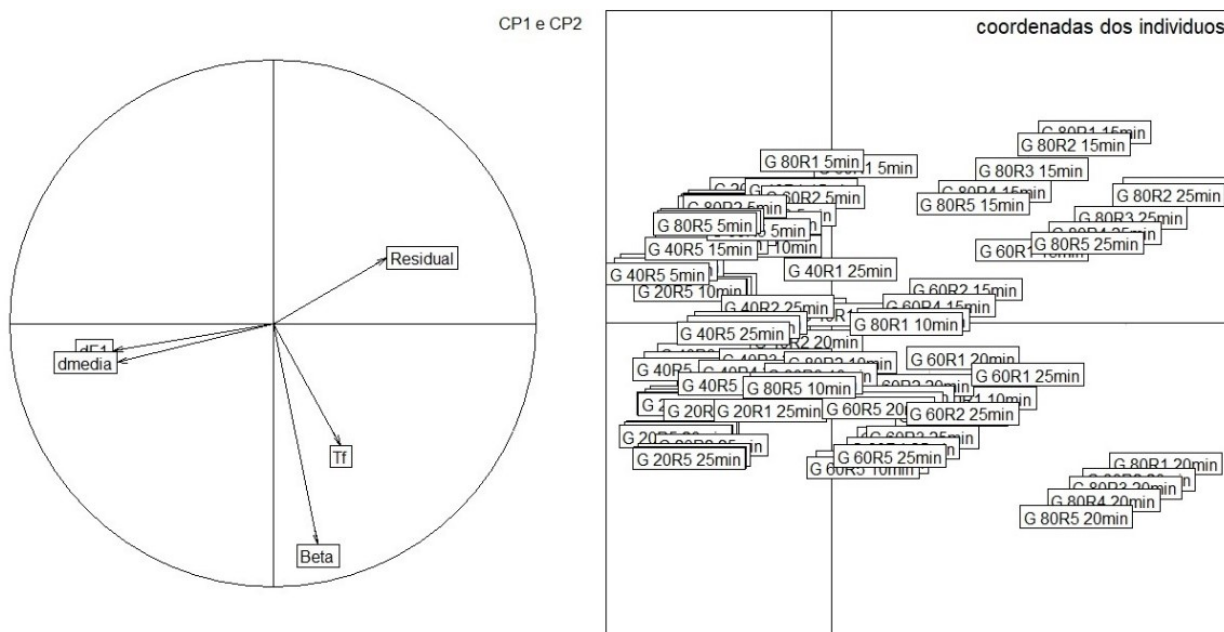


Figura 23. Comparação gráficos círculo das correlações e coordenadas dos indivíduos para as CP1 e CP2 na condição de análise 7.

A partir da comparação desses gráficos é possível perceber que o gradiente de agitação de 20 s^{-1} e 40 s^{-1} influenciaram mais na Df e $dmédia$, isso significa que a agitação de 20 s^{-1} e 40 s^{-1} foram determinantes na Dimensão de Fractal e na média dos diâmetros analisados para essa condição.

O gradiente de agitação de 60 s^{-1} caracterizou mais as variáveis de Tempo de Floculação e Beta, ou seja, as variáveis de duração de tempo de formação de flocos e na distribuição de tamanho agregados formados para a condição 7.

5.9 Flotação para água preparada com caulinita e coagulada com Cloreto Férrico (Condição de análise 8)

5.9.1 Correlação

A Tabela 32 mostra a análise de correlação obtida para a condição de análise 8.

Tabela 32. Matriz de correlação dos dados de Flotação com água preparada com caulinita e coagulada com Cloreto Férrico obtida através do Rstudio®.

	Tf	β	Df	dmédia	Residual Remanescente
Tf	1,00	0,30	-0,14	-0,14	0,22
β	0,30	1,00	0,30	0,58	0,01
Df	-0,14	0,30	1,00	0,64	-0,27
dmédia	-0,14	0,58	0,64	1,00	-0,24
Residual	0,22	0,01	-0,27	-0,24	1,00

Foi obtida a tabela de correlação para dos dados dessa condição de análise e portanto deu-se sequencia as análises de ACP.

5.9.2 Componentes Principais

Na Tabela 33 estão apresentadas as Componentes Principais obtidas pela análise de ACP para a condição 8.

Tabela 33. Componentes Principais obtidos pela ACP no RStudio® a partir da rotação Rotação (n x k) = (5 x 5).

Componentes Principais	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Tf	0,08	-0,70	0,52	-0,40	0,27
β	-0,46	-0,52	0,03	0,50	-0,53
Df	-0,56	0,12	-0,14	-0,74	-0,33
dmédia	-0,63	-0,03	-0,19	0,18	0,73
Residual Remanescente	0,28	-0,48	-0,82	-0,14	0,04

Foram selecionadas as CP's mais representativas da amostra de dados a partir do desvio padrão, variância, baseado no critério de Kaiser.

Na Tabela 34 é possível observar o desvio padrão, a proporção de variação e a proporção acumulada de cada CP.

Tabela 34. Importância dos Componentes Principais em ordem decrescente.

Componentes Principais	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Desvio padrão	1,45	1,18	0,87	0,72	0,48
Proporção de variância	0,42	0,28	0,15	0,10	0,05
Proporção acumulada	0,42	0,70	0,85	0,95	1,00

Foram utilizados o desvio padrão e a variância, baseados no critério de Kaiser, para a seleção das CP's mais representativas da amostra de dados.

A Tabela 35 apresenta a variância calculada para cada CP. A partir do critério de Kaiser foi possível definir que as Componentes Principais CP1 e CP2 explicam a maior porcentagem significativa dos dados originais e serão utilizadas para análise da condição de estudo 8.

Tabela 35. Variância dos CP's de cada variável.

Componentes Principais	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Variâncias	2,11	1,39	0,76	0,51	0,23

Pela análise da Tabela 35 podemos perceber que a somatória das variâncias resulta em valor igual a 5, que equivale a 100% da variação dos dados, portanto o valor da CP1 com 2,11 de variância explica 42,2% dos dados, enquanto a CP2 com 1,39 de variância explica 27,8% dos dados e, portanto, juntas elas explicam 70% da variação total dos dados, o que, nesse estudo, é suficiente para a representação dos dados originais.

Sendo assim, as componentes principais que mais explicam a variabilidade dos dados são a CP1 e CP2 (Tabela 36). Estas foram selecionados para uma análise mais detalhada.

Tabela 36. Componente Principal 1 e 2.

	CP1	CP2
Tf	0,08	-0,70
β	-0,46	-0,52
Df	-0,56	0,12
dmédia	-0,63	-0,03
Residual Remanescente	0,28	-0,48

Podemos verificar a partir da Tabela 36 que a Componente Principal 1 possui maiores valores em módulo para as variáveis $dmédia$ e Df , isso significa que a CP1 explica melhor a média dos diâmetros e Dimensão de Fractal.

A Componente Principal 2 possui maior valor em módulo para a variável Tf e β , isso significa que para a condição de análise 8, a CP2 explica melhor a variável Tempo de Floculação e de distribuição de tamanho dos flocos.

Na Figura 24 podemos observar o círculo das correlações entre as CP1 e CP2.

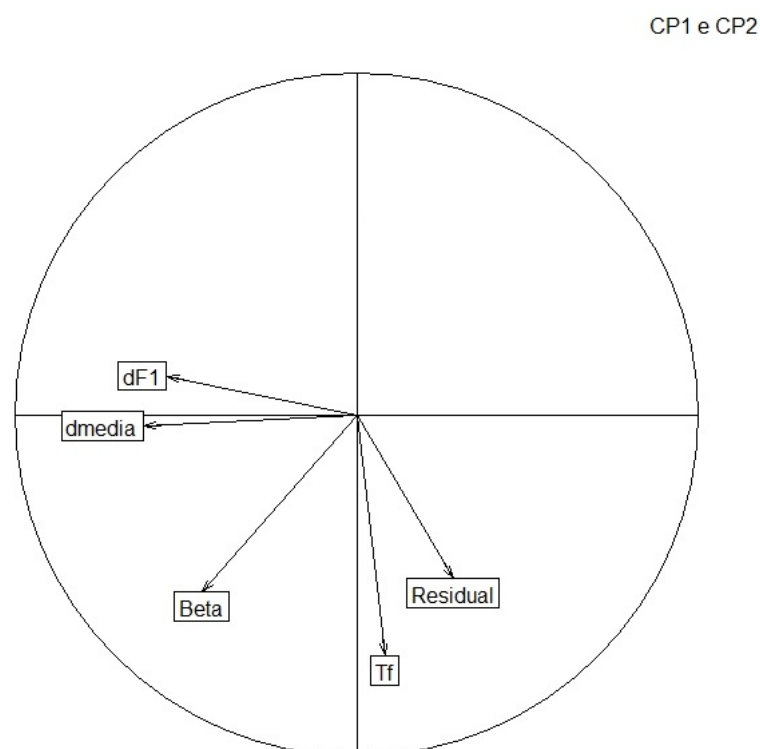


Figura 24. Gráfico círculo das correlações entre CP1 e CP2 para a condição de análise 8.

A CP1 foi plotada no eixo das abcissas, e a CP2 no eixo das ordenadas. Com essas informações é possível depreender do gráfico que a CP1 explica melhor as variáveis de média dos diâmetros e Dimensão de Fractal. Enquanto a CP2 explica melhor a variável de Tempo de Floculação e em menor proporção, Beta (β). Essas mesmas conclusões foram obtidas a partir da análise interpretativa dos dados numéricos das CP1 e CP2 (Tabela 37).

Como as CP1 e CP2 explicam juntas 70% dos dados, ou seja, massa mais expressiva dos dados, isso significa que para a Flotação com água preparada com caulinita coagulada com Cloreto Férrico (condição 8), as variáveis mais determinantes foram a média dos diâmetros, Dimensão de Fractal, o Tempo de Floculação e parâmetro representativo β .

Isso implica que em maior proporção, o tamanho dos flocos e o Tempo de Floculação, e em menor grau de importância, a forma, foram mais importantes nesse cenário de análise 8.

É importante ressaltar que a CP1 mostrou correlação mais alta com a média dos diâmetros, o que significa que o tamanho dos flocos formados foi determinante para essa condição de processo de remoção por Flotação com água preparada com caulinita e coagulada com Cloreto Férrico.

A Figura 25 mostra as coordenadas dos indivíduos plotada em forma de gráfico.

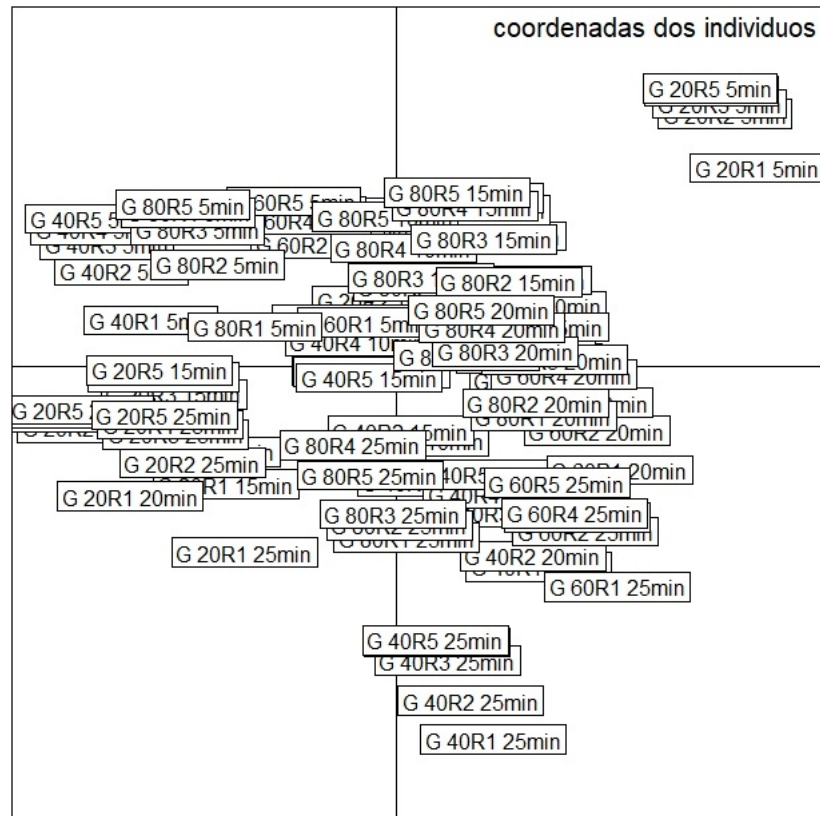


Figura 25. Gráfico das coordenadas dos indivíduos correspondentes as CP1 e CP2 para a condição de análise 8.

A Figura 25 permite analisar cada indivíduo da amostra, através do agrupamento por comportamento.

Buscando uma análise comparativa, o gráfico de círculo e o gráfico de indivíduos foram plotados lado a lado (Figura 26).

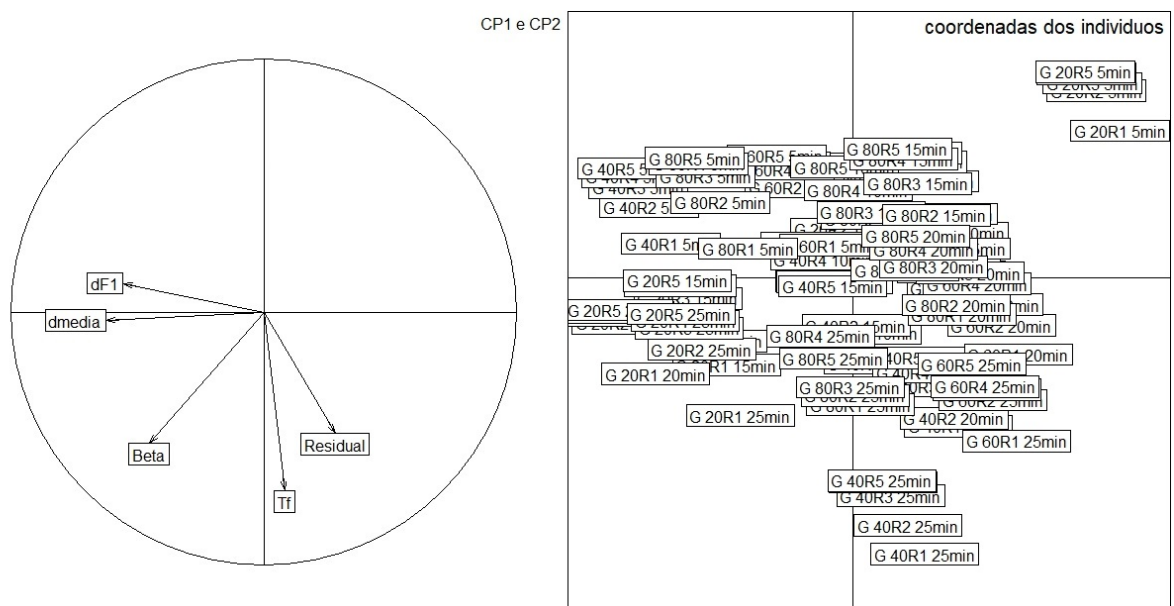


Figura 26. Comparação gráficos círculo das correlações e coordenadas dos indivíduos para as CP1 e CP2 na condição de análise 8.

A partir da comparação desses gráficos é possível perceber que o gradiente de agitação de 20 s^{-1} influenciou mais na dmédia para tempos de floculação menores (5, 10 e 15 minutos de agitação) e Beta (β), ou seja, para uma agitação mais lenta o tamanho do floco foi mais determinante.

O gradiente de 40 s^{-1} e 80 s^{-1} influenciaram mais em dmédia com tempo de floculação maior (20 e 25 min) e *tf* isso significa a média dos diâmetros e o Tempo de Floculação foram mais importantes para essas agitações de 40 s^{-1} .

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados descritos nesse trabalho verificou-se que:

- A ACP determinou 2 componentes principais representantes da variabilidade total dos dados, CP1 e CP2 respectivamente, para todas as condições de análise.
- Para as condições de análise 3 (Flotação com ácido húmico coagulado com Sulfato de Alumínio) e análise 4 (Flotação com caulinita coagulado com Sulfato de Alumínio) não foi possível fazer a Análise de Componentes Principais devido ao fato de os dados não apresentarem correlação.
- As Componentes Principais selecionadas para as condições de análise de estudo representaram de 63,8% a 72% da totalidade das massas de dados originais.
- Para todas as condições de análise a CP1 explicou melhor as variáveis de Dimensão de Fractal e média dos diâmetros, com exceção da condição de Sedimentação com água preparada com caulinita e coagulada com Cloreto Férrico (condição 6), na qual a CP1 explicou melhor a variável de média dos diâmetros e Beta (β).
- A CP1, que é a componente que melhor representa a variedade das massas de dados explica melhor as variáveis de tamanho dos flocos da amostra, do que as outras variáveis estudadas.

7. CONCLUSÃO

Para todas as condições de análises estudadas as variáveis que mais sofreram interferência das condições do conjunto gradiente de agitação x tempo de floculação foram as variáveis representativas de tamanho dos flocos formados. Ou seja, o tamanho do agregado foi mais determinante nas condições estudadas do que os outros parâmetros analisados.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABDELLATIF, M. H., ABDELRASOUL, G. N., SALERNO, M., LIAKOS, I., SCARPELLINI, A., MARRAS, S. and DIASPRO, A. Fractal analysis of inter-particle interaction forces in gold nanoparticle aggregates. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 497, 225–232 (2016).
2. ALMEIDA, T. D., Avaliação do desempenho da sedimentação e sua relação com distribuição do tamanho de partículas e com agregados de fractal. **Aleph**, p. 40 f., 7 jun. 2017.
3. AMIRTHARAJAH, A.; O'MELIA, C.R., Coagulation Processes: Destabilization, Mixing, and Flocculation. In: AWWA. Water quality and treatment – A handbook of community water supplies. (Cap. 6). McGraw-Hill, Inc., (1999). 5th ed. USA, 1233p.
4. AMIRTHARAJAH, A.; O'MELIA, C. R., Coagulation Processes: Destabilization, Mixing and Flocculation. In: AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies. 4th edition, NovaYork: McGraw-Hill, Inc., 1990. cap. 6, p. 269-453.
5. ASSIS, Thiago Albuquerque de et al. Geometria fractal: propriedades e características de fractais ideais. *Rev. Bras. Ensino Fís.*, São Paulo, v. 30, n. 2, p.2304.1-2304.10, 2008. Available from:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172008000200005&lng=en&nrm=iso>.access on 05 Jan. 2020.

6. BALTAR, C.A.M., OLIVEIRA, J.F., Flocculation of colloidal silica with polyacrylamide and the effect of dodecylamine and aluminium chloride pre-conditioning. (1998). Miner. Eng. 11, 463–467.
7. BUNCHAFT, G.; KELLNER, S.R. de O. Estatística sem mistérios. 4.ed. Petrópolis: Vozes, 2002. v.2, 303p.
8. CHAKRABORTI, R. K., et al. Changes in fractal dimension during aggregation. Elsevier Science Ltd. United States of America, p. 873-883, Feb. 2003.
9. CHAKRABORTI, R. K., et al., Characterization of alum floc by image analysis, Environ. Sci. Technol., 34 (2000), pp. 3969-3976
10. CHING, H.-W.; TANAKA, T. S.; ELIMELECH, M. Dynamics of coagulation of kaolin particles with ferric chloride. Water Research, v. 28, n. 3, p. 559–569, 1 mar. 1994.
11. CHOWDHURY, R. K. e EL-SHORBAGY, W. Informatics, Logistics and Governance in Water Treatment Processes. In: ELSHORBAGY, W. e CHOWDHURY, R. K. Water Treatment. United Arab Emirates: INTECH, Jan. 2013. p. 1-12.

12. COLLIVIGNARELLI, M. C. et al., Process auditing and performance improvement in a mixed wastewater-aqueous waste treatment plant. *Water Science and Technology*, p. wst2017605, 30 nov. 2017.
13. CONSTANTINO, L. T. Ruptura e recrescimento de flocos em água com substâncias húmicas aquáticas coagulada com sulfato de alumínio e cloreto férrico. 164 p. Tese (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos – SP, 2008.
14. DENTEL, S.K., Coagulation control in water treatment *Crit. Rev. Envir. Control*, 21 (1991), pp. 41-135.
15. DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D.B. Métodos e técnicas de tratamento de água. Segunda Edição. São Carlos. RiMa, 2005. 792p.
16. EDZWALD, J. K. Dissolved air flotation and me. *Water Research*, v. 44, n. 7, p. 2077–2106, 1 abr. 2010.
17. EDZWALD, J. K. Principles and applications of dissolved air flotation. In: Ives KJ, Bernhardt HJ (eds.). *Flotation processes in water and sludge treatment*, (1995). 3–4 edn. vol 31, *Wat Sci Tech*, Great Britain, pp 1–23.
18. FRANCOIS, S.B., Strength of aluminum hydroxide flocs. *Water Res.* 21, 1023–1030, 1987.

19. GREGORY, J.; CHUNG, H. Continuous monitoring of floc properties in stirred suspensions. (1995). J. Water SRT – Aqua, Blackwell Science Ltd, v.44, n.3, p.125-131.
20. GREGORY, J. The density of particle aggregates Water Sci. Technol., 36 (1997), pp. 1-13
21. GURPREET, S. M., KALSHIK, C. S. K, e MUKHERJI, A. C. S., Revelations of an overt water contamination. Elsevier B.V. on behalf of Director General, Armed Forces Medical Services., volume 73, issue 3, p. 250–255, July 2017.
22. HAN, M.; KIM, T.; KIM.J. Application of image analysis to evaluate the flocculation process. Journal of Water Supply: Research and Technology, v. 55, n.7-8, p. 452-459. 2006.
23. HOGG, R., Flocculation and dewatering. (2000). Int. J. Miner. Process.58, 223–236.
24. HONGYU, K. Comparação do GGEbiplot ponderado e AMMI-ponderado com outros modelos de interação genótipo × ambiente. 2015. 155p. Tese (Doutorado em Estatística e Experimentação Agronômica) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.
25. JOHN, C. CRITTENDEN. MWH's Water: treatment principles and design. Third edition. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2012. p. 1901.

26. JOHNSON, C. P. et al. Settling velocities of fractal aggregates. *Environ. Sci. Technol.*, 30 (1996), pp. 1911-1918
27. JOHNSON, R.A.; WICHERN, D.W. *Applied multivariate statistical analysis*. Madison: Prentice Hall International, 1998. 816p.
28. LAKGHOMI, B.; LAWRYSHYN, Y.; HOFMANN, R. A model of particle removal in a dissolved air flotation tank: Importance of stratified flow and bubble size. *Water Research*, v. 68, n. Supplement C, p. 262–272, 1 jan. 2015.
29. LAWLER, D. F., Particle size distributions in treatment process: theory and practice. (1997). *Water Science and Technology – Elsevier Science Ltd*, v.36, n.4, p.15-23.
30. LEENTVAAR, J., REBHUN, M., Strength of ferric hydroxide flocs. *Water Res.* 17, 895–902, 1983.
31. LI, T. et al. The strength and fractal dimension characteristics of alum–kaolin flocs. *International Journal Of Mineral Processing*, Beijing, Pr China, v. 82, n. 1, p.23-29, 2006.
32. MORUZZI, R. B. Avaliação da Influência da Distribuição de Tamanho de Partículas e do Binômio Velocidade/Tempo de Detenção na Zona de Reação no Desempenho da Flotação com Utilização de Sonda Ultrasônica e Técnica de Análise por Imagem. Tese de doutorado apresentada à Escola de

Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: EESC – USP. 240p, 2005.

33. MORUZZI, R. B. Avaliação do desempenho do processo de floculação usando parâmetro característico da função distribuição de tamanho de partículas: experimentação, modelagem e simulação / Rodrigo Braga Moruzzi. - Rio Claro, 2014.
34. MORUZZI, R. B. et al. Fractal dimension of large aggregates under different flocculation conditions. Science of The Total Environment, v. 609, n. Supplement C, p. 807–814, 31 dez. 2017.
35. MORUZZI, R. B.; JULIO, M. D.; OLIVEIRA, A.L. Equipamento de Monitoramento Contínuo da Floculação (EMCF): experimentação, correlação e calibração. Revista DAE, São Paulo – SP, 2015.
36. MORUZZI, R. B., OLIVEIRA, A. L., De JULIO, M., DUTRA, R. H. A. & SILVA, P. A. G. Floculação: considerações a partir da análise clássica e da avaliação direta da distribuição de tamanho de partículas. Revista Engenharia Sanitaria e Ambiental 21(3), 1-8 (2016).
37. MORUZZI, R.B.; REALI, M.A.P. Characterization of microbubble size distribution and flow configuration in DAF contact zone by a non-intrusive image analysis system and tracer tests, Water Sci. Technol. 61(1). 253–262, 2010.

38. MORUZZI, R. B.; REALI, M.A.P. Método para determinação de distribuição de tamanho de microbolhas (DTMB) em sistemas flotação (FAD) para tratamento de águas utilizando a análise de imagem digital. Eng. Sanit. Ambient., Rio de Janeiro, v. 12, n. 3, p. 273-283, 2007.
39. MORUZZI, R. B.; REALI, M. A. P. The influence of floc size and hydraulic detention time on the performance of a dissolved air flotation (DAF) pilot unit in the light of a mathematical model. Bioprocess and Biosystems Engineering, v. 37, n. 12, p. 2445–2452, 1 dez. 2014.
40. OLIVEIRA, A.L.; MORENO, P.; SILVA, P. A. G. da; JULIO, M.D; MORUZZI, R.B. Effects of the fractal structure and size distribution of flocs on the removal of particulate matter, Desalination and Water Treatment, 2015.
41. O'MELIA, C.R. Physicochemical processes for water quality control (Weber W.J. Jr., ed.), Wiley-Interscience, New York, U.S.A., 1972
42. PÁDUA, V.L. Metodologia para determinação dos gradientes de velocidade médios em unidades de floculação de mistura completa com câmaras em série e escoamento contínuo a partir de reatores estáticos. 165 p. São Carlos. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1994.
43. PRADO, G.S., CAMPOS, J. R., O emprego da análise de imagem na determinação da distribuição de tamanho de partículas da areia presente no

- esgoto sanitário. Eng Sanit Ambient., Espírito Santo, v.14 n.3, p. 401-410, 2009.
44. RALSTON, J., Fornasiero, D. & Mishchuk, N. 2001 The hydrophobic force in flotation - a critique. Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp. 192, 39–51.
45. REALI, M.A.P. Conception and evaluation of a compact water treatment system containing an original declined rate floto-filtration unit. PhD Thesis, São Carlos Engineering School, University of São Paulo, 1991.
46. SANTOS, H.R. dos.; PRADO, G.S do; VIDAL, C.M.S; MORUZZI, R.B; CAMPOS, J.R. Aplicabilidade das técnicas de determinação de tamanho de partículas em sistemas de tratamento de água e esgoto sanitário. Eng. Sanit. Ambient., Rio de Janeiro, v. 9, n. 4, p. 291-300, 2004.
47. SILVA, P. A. G. Força e dimensão fractal para floco de caulinita coagulado com sal de alumínio aplicado ao tratamento de água para abastecimento. Aleph, p. 20 f., 2016.
48. THOMAS, D. N.; JUDD, S. J.; FAWCETT, N. Flocculation modelling: a review. Water Research, v. 33, n. 7, p. 1579–1592, 1 maio 1999.
49. VAHEDI, A.; GORCZYCA, B. Predicting the settling velocity of flocs formed in water treatment using multiple fractal dimensions. Water Research, v. 46, n. 13, p. 4188–4194, 1 set. 2012.

50. VICINI, L. Análise multivariada da teoria à prática. Santa Maria: Departamento de Estatística, 2005.
51. VOLTAN, P.E.N. Avaliação da ruptura e do recrescimento de flocos na eficiência de sedimentação em água com turbidez elevada. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
52. WAITE, T. D. Measurement and implications of floc structure in water and wastewater treatment. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v. 151, n. 1, p. 27–41, 15 jun. 1999.
53. WEI, J. Comments on paper: “Evolution of aggregate size and fractal dimension during Brownian coagulation” by Margaritis Kostoglou, Athanasios G. Konstandopoulos. Journal of Aerosol Science, 81, 21–23 (2015).
54. WILKINSON, N.; METAXAS, A.; BRICHETTO, E.; WICKRAMARATNE, S.; REINEKE, T. M. and DUTCHER, C. S. Ionic strength dependence of aggregate size and morphology on polymer-clay flocculation. Colloids and Surfaces A, 529, 037-1046 (2017).
55. Yang, Z.; Yang, H.; Jiang, Z.; Huang, X.; Li, H.; Li, A.; Cheng, R. A new method for calculation of flocculation kinetics combining Smoluchowski model with fractal theory. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 423, 11-19 (2013).

56. YAO, M. et al. Effect of under-dosing coagulant on coagulation–ultrafiltration process for treatment of humic-rich water with divalent calcium ion. *Journal of Membrane Science*, v. 495, n. Supplement C, p. 37–47, 1 dez. 2015.
57. YEUNG, A.K., PELTON, R., Micromechanics: a new approach to studying the strength and breakup of flocs. *J. Colloid Interface Sci.* 184, 579–585, 1996.
58. YU, W., GREGORY, J., CAMPOS, L., GRAHAM, N., Dependence of floc properties on coagulant type, dosing mode and nature of particles. *Water Research* 68, 119-126 (2015).
59. YU, W.; GREGORY, J.; CAMPOS, L. The effect of additional coagulant on the re-growth of alum–kaolin flocs. *Separation and Purification Technology*, v. 74, n. 3, p. 305–309, 6 set. 2010.
60. YUKSELEN, M.A. & GREGORY, J. (2004) The reversibility of floc breakage. *International Journal of Mineral Processing*, v. 73, n.2-4, p. 251-259.
61. ZHANG, X.H.; ZHONG, R.S.; LI, X.Y.; LAM, K.M.; XIAO, F. PIV characterisation of flocculation dynamics and floc structure in water treatment. Elsevier. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 379, 27–35, 2011.
62. Zhong, R.; Zhang, X., Xiao, F. and Li, X. Effects of humic acid on recoverability and fractal structure of alum-kaolin flocs. *Journal of Environmental Sciences*, 23 (5), 731-737 (2011).