

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL

**Protocolo experimental do estudo de tratabilidade para adequação do
afluente às estações de tratamento de água de Itueta e Resplendor a
partir de captação no Rio Doce**

PROF. MARCELO LIBÂNIO

Belo Horizonte

Abril 2024

1 – APRESENTAÇÃO

O presente protocolo visa a fornecer as informações essenciais que balizarão a realização do estudo de tratabilidade das águas do Rio Doce, passíveis de afluir às estações de tratamento de Itueta e Resplendor em Minas Gerais. Tal estudo objetiva estimar a capacidade das mencionadas estações na potabilização de águas de elevada turbidez, após o período de paralisação das captações no Rio Doce decorrente do rompimento da Barragem de Fundão em novembro de 2015.

A concepção das duas estações de tratamento de água pautou-se no emprego da tecnologia convencional de potabilização¹ que, por sua vez, se calca em três premissas que se inter-relacionam: robustez, resiliência e confiabilidade. A robustez da tecnologia de tratamento adotada traduz a capacidade das estações, quando adequadamente operadas, de manter a produção de água tratada com qualidade estável, independente das variações que possam ocorrer nas características das águas do Rio Doce. A esta premissa soma-se a resiliência que expressa a velocidade com que a estação retornaria ao seu desempenho normal após algum distúrbio, por exemplo, causado pelo rompimento da Barragem de Fundão e consequente passagem da pluma de rejeitos. Por fim, a confiabilidade avalia a probabilidade com que o efluente das estações atinja as metas de qualidade impostas pela Portaria 888/2021², pelo maior período de tempo³.

Como consequência, considerando os mananciais superficiais, estima-se que a 94% da população urbana abastecida no Brasil aflua água tratada em aproximadamente 5.500 estações convencionais⁴. Apenas a Companhia de Saneamento de Minas Gerais (Copasa) responde pela operação de algo como 592 unidades distribuídas em todo Estado, onde aproximadamente 83% da população é abastecida por mananciais superficiais, na essência, cursos d'água e reservatórios de acumulação.

2 – CONTEXTUALIZAÇÃO

Conforme mencionado em outro relatório, logo após o rompimento da Barragem de Fundão, ao longo rio Gualaxo do Norte, do Rio do Carmo e da calha do Rio Doce registraram-se valores extemporâneos de diversos parâmetros de qualidade de água, tais como turbidez (≈ 606.200 uT), ferro dissolvido (32,3 mg/L), manganês total (936,0 mg/L) e alumínio dissolvido (32,2 mg/L). Como consequência, houve paralisação das 16 estações de tratamento em dez cidades por período variável

¹ Tecnologia de tratamento das águas naturais dotada das etapas de coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção.

² MINISTÉRIO DA SAÚDE - Portaria 888: Normas e padrão de potabilidade da água destinada ao consumo humano, Brasília, 29 p., maio 2021.

³ ZHANG, K. et al. - *An integrated performance assessment framework for water treatment plants*, Water Research, v.46, n.6, p.1673-1683, 2012.

⁴ OLIVEIRA, M. D.; BIANCHI, D. Z.; FONSECA, J. F.; GORZA JÚNIOR, N. & LIBÂNIO, M. - *Avaliação de fatores intervenientes no desempenho de estações de tratamento de água*, Engenharia Sanitária e Ambiental, v.26, n.4, p.613-625, agosto 2021.

com distribuição de água envasada à população. Deste grupo de estações, a 14 unidades⁵ voltaram a afluir águas captadas no Rio Doce abastecendo população da ordem de 450 mil pessoas, à exceção das mencionadas estações de Itueta e Resplendor.

A estação de tratamento de Itueta apresenta medidor eletromagnético instalado na adutora de água bruta e a mistura rápida ocorre na câmara de chegada. Seguem-se um floculador hidráulico de escoamento vertical de passagem forçada, dois decantadores circulares de escoamento horizontal e um filtro rápido de escoamento descendente de dupla camada⁶.

Por outro lado, a estação de tratamento de Resplendor apresenta unidade de mistura rápida com Medidor Parshall de 15,2 cm (6") de dimensão de garganta, floculador hidráulico de escoamento helicoidal de 17 câmaras, dois decantadores de escoamento horizontal e três filtros de escoamento descendente de dupla camada⁷.

Algumas características físicas e os principais parâmetros hidráulicos das unidades responsáveis pelos processos e operações unitárias nas duas estações são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características físicas e principais parâmetros hidráulicos das estações de tratamento de água de Itueta e Resplendor.

	ETA Itueta	ETA Resplendor
Vazão média afluyente (L/s)	~15	~60
Dimensão da garganta do Medidor Parshall (cm/pol)	Não disponível	15,2 (6)
Gradiente de velocidade de mistura rápida (s ⁻¹)	Não calculável	1501
Tempo de mistura rápida (s)	5,6	0,32
Número de câmaras de floculação	5	17
Tempo de detenção no floculador (min)	9,7	31,7
Gradiente de velocidade de floculação (s ⁻¹)	22~44	32~50
Velocidade de sedimentação (cm/min)	1,2	2,3
Tipo de meio filtrante	Dupla camada	Dupla camada
Taxa média de filtração (m ³ /m ² dia)	245	160

Neste contexto, o estudo de tratabilidade insere-se na mesma vertente aplicada às estações de tratamento de água e Linhares, visando a avaliar a capacidade das duas estações e a perspectiva de

⁵ As estações de tratamento com captação no Rio Doce estão localizadas em Alpercata, Cachoeira Escura (Belo Oriente), Pedra Corrida, Galileia, Governador Valadares (5) e Tumiritinga, em Minas Gerais, e Baixo Guandu e Colatina (3) no Espírito Santo. Às três estações de tratamento de Linhares aflui água do Rio Pequeno que interliga a Lagoa Juparanã ao Rio Doce.

⁶ OeM Engenharia – Projeto Conceitual – Estudo de Concepção da Captação Alternativa e ETA, 159 p., março de 2021.

⁷ Sanehatem Consultoria e Projeto Ltda – Projeto Conceitual – Adequação de Projetos para Atendimento de Resplendor, 35 p., dezembro de 2021.

retorno à operação das duas captações no Rio Doce. Os ensaios de tratabilidade serão realizados no laboratório da empresa Limnos em Vespasiano/MG. O estudo de tratabilidade proposto, em primeira etapa, vai contemplar apenas a etapa de clarificação, no que tange à definição do coagulante primário e auxiliar de coagulação mais adequados, respectivas doses ótimas e valores de pH de coagulação para águas de elevada turbidez captadas no Rio Doce. Posteriormente, realizar-se-á a filtração em papel de filtro de amostras do sobrenadante nas condições ótimas de coagulação.

3 - METODOLOGIA

3.1 – Preparação das águas de estudo

Como os ensaios de tratabilidades serão realizados durante o período de estiagem, tenciona-se simular as características das águas de estudo de acordo com os registros do Programa de Monitoramento Qualiquantitativo de Água e Sedimentos (PMQQS) nos dois pontos de captação no Rio Doce. Desta forma, inicialmente, serão coletadas amostra dos sedimentos próximos às duas captações e volume de água do Rio Doce de aproximadamente 500 L em cada ponto de captação.

A suspensão formada pelos sedimentos e as águas do Rio Doce serão armazenadas em bombonas de 50 L nas dependências do laboratório da Limnos. Antes da coleta da alíquota de 12 L a ser utilizada nos ensaios proceder-se-á à agitação do volume contido no reservatório para evitar a precoce sedimentação das partículas suspensas. Após a preparação da água de estudo, antes de cada ensaio de *Jar Test*, serão determinados os parâmetros pH, alcalinidade, turbidez e temperatura da alíquota a ser disposta em cada um dos seis frascos. Em princípio, serão preparadas e avaliadas nos ensaios de tratabilidade, a partir de coleta de amostra nos dois pontos de captação, as águas de estudo cujas características estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características da água de estudo a ser utilizada nos ensaios de tratabilidade de acordo com o afluente às estações de tratamento de Itueta e Resplendor.

Água de Estudo (Estação de Tratamento)	Turbidez (uT)
Água Tipo I (Itueta)	X (valor da amostra)
	X + 50 ($\pm 10\%$)
	X + 150 ($\pm 5\%$)
	X + 350 ($\pm 5\%$)
	1000 \pm 50
Água Tipo II (Resplendor)	X (valor da amostra)
	X + 50 ($\pm 10\%$)
	X + 150 ($\pm 5\%$)
	X + 350 ($\pm 5\%$)
	1000 \pm 50

Os valores da turbidez das cinco águas de estudo passíveis de afluir a cada estação de tratamento, apresentados na Tabela 2, foram definidos a partir da turbidez da amostra coletada no Rio Doce. Estima-se, a partir dos registros do PMQQS, que a turbidez nos dois pontos de captação deverá apresentar turbidez da ordem de 50~70 uT.

3.2 – Descrição dos equipamentos e produtos químicos utilizados

Conforme mencionado no protocolo do estudo de tratabilidade para as três estações de Linhares, os ensaios consistem em submeter inicialmente o volume de 2 L da água de estudo de cada frasco a forte agitação simultânea à dispersão dos produtos químicos, visando a simular a operação de mistura rápida que se sucede em escala real. Após pequeno intervalo de tempo a rotação é significativamente reduzida para que haja condições da formação dos flocos – representando a floculação nas duas estações. Por fim, após a paralisação do agitador de cada frasco, o volume permanecerá em repouso para coleta das amostras de água decantada⁸. Definidas as condições ótimas para cada água de estudo, repete-se o ensaio com as mesmas doses nos seis frascos e, após filtração em papel de filtro, determinam-se os quatro parâmetros de qualidade de interesse objetivando estimar a eficiência da filtração.

Conforme mencionado, os ensaios de tratabilidade serão realizados na Limnos, em equipamento de *Jar Test*, dotado de seis frascos de 2 L, apto à dispersão simultânea dos coagulantes, à coleta simultânea de água decantada a 7,0 cm da superfície líquida e a conferir gradientes de velocidade de 10~2000 s⁻¹. Na Figura 1 apresenta-se o equipamento e aspecto visual das amostras ao final de um ensaio de tratabilidade.

⁸ LIBÂNIO, M. – *Adequação e otimização de estações de tratamento de água* in: Fundamentos de qualidade e tratamento de água, 4ª Ed., Atomo, Campinas, 640 p., 2016.

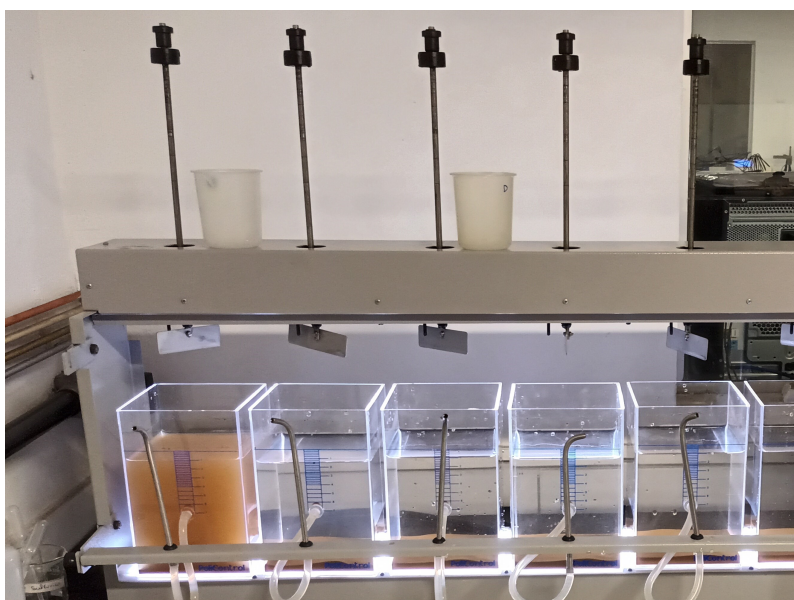


Figura 1. Modelo de equipamento de *Jar Test* a ser empregado nos ensaios de tratabilidade no laboratório da Limnos⁹

Os ensaios de tratabilidade serão realizados inicialmente utilizando o cloreto de polialumínio como coagulante primário e hidróxido de cálcio ou hidróxido de sódio como alcalinizante. O emprego inicial deste coagulante primário baseia-se na rotina operacional das duas estações antes do rompimento da Barragem de Fundão.

Em função dos resultados dos primeiros ensaios, poderão ser também avaliados o cloreto férrico e o sulfato de alumínio como coagulantes primários, e polímeros sintéticos mais facilmente obteníveis como auxiliares de coagulação. Para tal, dispersa-se nos seis frascos a mesma dose ótima do coagulante primário definida na etapa anterior, variando-se as doses de polímero (preferencialmente até o limite de 2,0 mg/L) a serem aplicadas concomitantemente.

3.3 – Parâmetros hidráulicos aplicados nos ensaios de tratabilidade

A definição dos parâmetros hidráulicos dos ensaios de tratabilidade norteou-se nos valores expostos na Tabela 1. Neste cenário, utilizando-se o equipamento de *Jar Test* da Figura 1, os parâmetros hidráulicos utilizados nos ensaios estão apresentados conforme Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros hidráulicos utilizados nos ensaios de tratabilidade em equipamento de *Jar Test* para as duas águas de estudo passíveis de afluir às estações de tratamento de Itueta e Resplendor

Parâmetro hidráulico	Mistura Rápida		Floculação		Decantação
	Tempo de agitação (s)	Gradiente de velocidade (s ⁻¹)	Tempo de floculação	Gradiente de velocidade (s ⁻¹)	Tempo de sedimentação

⁹ Mesmo modelo de equipamento empregado em junho de 2023 por ocasião do estudo de tratabilidade das águas do Rio Doce passíveis de afluir às estações de tratamento de Linhares.

					(min)		(min)
Água	Tipo I	5	400 ± 20	8	33 ± 5	5,8	
(ETA Itueta)							
Água	Tipo II	5	800 ± 20	32	41 ± 5	3,0	
(ETA Resplendor)							

Em relação aos parâmetros listados na Tabela 3, cabem alguns comentários. Na estação de tratamento de Itueta não se dispõe de unidade de mistura rápida. Desta forma, optou-se por menor valor do gradiente de velocidade, mantendo-se o tempo de agitação idêntico para as duas águas para favorecer a exequibilidade dos ensaios. Para coagulação no mecanismo da varredura¹⁰, condição usual para as estações convencionais de tratamento de água e especificamente às duas unidades de Itueta e Resplendor, a magnitude do tempo de detenção e do gradiente de velocidade da mistura rápida assume papel secundário.

Para a etapa de floculação, optou-se por definir a realização dos ensaios para gradiente de velocidade constante, embora este parâmetro seja decrescente ao longo das câmaras nas duas estações. Sabe-se que a floculação realizada com gradiente de velocidade variável decrescente ao longo das sucessivas câmaras apresenta consistentemente melhores resultados em termos de formação dos flocos, quando comparada à floculação com gradiente constante. Contudo, optou-se novamente por realizar os ensaios para o cenário mais desfavorável com gradiente de velocidade constante.

Ainda para esta operação unitária, a definição do tempo de floculação para os ensaios com as duas águas de estudo merece alguns comentários. Não se conhecem a configuração das aberturas para a estação de Itueta, dotada de apenas cinco câmaras de floculação. De qualquer forma, optou-se, para os ensaios com a água de estudo Tipo I, por reduzir em pouco menos de 20% o tempo teórico apresentado na Tabela 1, devido aos efeitos de curto-circuito¹¹. Para a água Tipo II, as 17 câmaras em série da estação de Resplendor tornam tais efeitos desprezíveis e adotou-se praticamente o mesmo valor do tempo de floculação teórico.

Por fim, ambas estações de tratamento não apresentam sobrecarga nas unidades de decantação de escoamento horizontal. Assim, definiram-se os tempos de sedimentação como consequência das velocidades de sedimentação apresentadas para cada estação na Tabela 1. Conforme mencionado no protocolo para as estações de Linhares, o mecanismo de floculação denominado *sedimentação diferencial*, decorrente da desuniformidade de volume e de densidade dos flocos formados, torna os resultados dos

¹⁰ Em função do pH de coagulação, à medida que se eleva progressivamente a dose do coagulante primário passa a predominar mecanismo de coagulação definido como *sweep coagulation*, pela inexistência de relação estequiométrica entre a magnitude da turbidez e dose do coagulante primário. Esta ausência de relação estequiométrica exemplifica-se, hipoteticamente, na dose ótima de sulfato de alumínio de 18 mg/L para água bruta de turbidez da ordem de 100 uT e de 40 mg/L para a mesma água quando a turbidez se eleva para 1000 uT.

¹¹ O curto-circuito dá-se quando parcela substancial da vazão afluyente permanece na unidade de floculação por tempo

ensaios mais críveis quando aplicados em escala real. Neste mecanismo, os flocos adquirem distintas velocidades de sedimentação no interior da unidade de decantação, concorrendo para que no movimento descendente na unidade de decantação ocorram novos choques e consequente formação de flocos mais pesados

Como os ensaios de tratabilidade serão realizados para água de estudo com turbidez elevada, apenas para as condições ótimas de remoção de turbidez – em termos de dose do coagulante primário e respectivo pH de coagulação – poderá ser avaliada a aplicação de polímero como auxiliar. No mesmo viés, conforme mencionado, após definidas as condições ótimas para o coagulante primário, com ou sem a dispersão do polímero, tais ensaios serão repetidos visando também a determinação das concentrações remanescentes de ferro dissolvido, manganês total e alumínio dissolvido.

A síntese dos resultados para remoção de turbidez - estes registrados em tabelas similares às do Apêndice – poderá ser apresentada conforme denota a Tabela 4, extraída do mencionado estudo com as águas do Rio Doce passíveis de afluir às estações de Linhares.

Tabela 4. Exemplo de resultado de ensaio de tratabilidade com as doses ótimas de sulfato de alumínio como coagulante primário e de polímero catiônico como auxiliar de coagulação¹²

Jarro	Dose de sulfato de alumínio (mg/L)	Dose de polímero (mg/L)	pH de coagulação	Turbidez remanescente (uT)	Turbidez após filtração (uT)
1	230	8,0	6,4	7,45	0,63
2	230	8,0	6,4	3,70	0,47
3	230	8,0	6,4	2,68	0,43
4	230	8,0	6,3	3,61	0,60
5	230	8,0	6,3	2,70	0,40
6	230	8,0	6,3	2,87	0,34

Por fim, para elaboração da síntese de resultados dos ensaios de tratabilidade apresentada na Tabela 4, estima-se que podem se fazer necessários algo como 60 ensaios de *Jar Test* para cada água de estudo, além dos ensaios *confirmatórios* de remoção dos metais. Posteriormente, as condições ótimas de coagulação que emergirão deste estudo de tratabilidade serão aplicadas em escala real às duas estações de tratamento, com monitoramento da qualidade do efluente calcado na totalidade dos parâmetros que integram o atual padrão de potabilidade estabelecido pela Portaria 888/2021.

inferior ao teórico, ou definido em projeto, reduzindo a eficácia da formação dos flocos e posterior sedimentação.

¹² Resultados do ensaio realizado em 06 de junho de 2023 com a presença de profissionais da Limnos, Fundação Renova, Aecom e Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Linhares.

Marcelo Libânio

Marcelo Libânio

Professor Titular do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental

APÊNDICE A – FICHA DE REGISTRO DOS ENSAIOS DE TRATABILIDADE

ESTUDO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO-SEDIMENTAÇÃO

Características da água de estudo	
Turbidez (uT)	pH

Parâmetros aplicados ao equipamento de *Jar Test* de acordo com o cenário avaliado

Mistura Rápida		Floculação		Sedimentação
Tempo de agitação (s)	Gradiente de velocidade (s ⁻¹)	Tempo de floculação (min)	Gradiente de velocidade (s ⁻¹)	Tempo de sedimentação (s)

Concentração da solução do coagulante primário = ____ %

Concentração da solução de polímero = ____ %

Ensaio 1

Frasco	Dosagem de Produtos Químicos				pH de coagulação	Turbidez Remanescente (uT)
	Cloreto de Polialumínio (mg/L)	Volume Cloreto de Polialumínio (mL)	Polímero (mg/L)	Volume Polímero (mL)		
01						
02						
03						
04						
05						
06						