TRATAMENTO DE EFLUENTES DE INDÚSTRIAS DE ABATE DE AVES POR FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO: RELAÇÃO AR/SÓLIDOS, TAXA DE RECIRCULAÇÃO E SELEÇÃO DE POLÍMEROS CONDICIONANTES

Halice Jerônimo de Araúo Siva[(1)]
Engenheira Civil pela UFPE - Universidade Federal de Pernambuco.
Pós-Graduada em Saneamento Básico e Meio Ambiente pelo INBEC - Instituto Brasileiro de Educacão Continuada.
Mayra Angelina Quaresma Freire[(2)]
Engenheira Civil pela UFPE - Universidade Federal de Pernambuco.
Mestranda em Geotecnia na UFPE - Universidade Federal de Pernambuco.
Maria Clara Quaresma Freire[(3)]
Graduanda em Engenharia Civil na UPE/POLITÉCNICA Universidade de Pernambuco.
André Victor Freire da Silva[(4)]
Graduando em Engenharia Civil na UPE/POLITÉCNICA Universidade de Pernambuco.
André Farias da Silva [(5)]
Engenheiro Civil pela UFAL - Universidade Federal de Alagoas.

Endereço[(1)]**:** Av. Prof. Moraes Rego, 1235 – Cidade Universitária - Recife - Pernambuco - CEP: 50670-901 - Brasil - Tel: +55 (81) 98759-3572 - e-mail: halice.araujo@ufpe.br.

RESUMO

A indústria de abate e processamento de aves é uma das principais geradoras de efluentes de alta carga orgânica, com elevadas concentrações de óleos e graxas (OG), sólidos suspensos totais (SST) e matéria nitrogenada no Brasil, país que figura como o maior exportador mundial de carne de frango. O tratamento desses efluentes por flotação por ar dissolvido (FAD) constitui a tecnologia de separação sólido-líquido mais amplamente empregada nesse segmento industrial, em razão de sua eficácia comprovada na remoção de compostos de baixa densidade, especialmente OG e proteínas coloidais. Este artigo apresenta um estudo experimental sobre a aplicação da FAD ao tratamento de efluentes avícolas, fundamentado em ensaios de Jar Test e de Flotatest realizados com efluente real de frigorífico avícola, com ênfase nos fundamentos do processo, na relação ar/sólidos (A/S) como parâmetro central de dimensionamento, na taxa de recirculação da fase líquida saturada como variável operacional determinante, e na seleção e caracterização de polímeros condicionantes adequados. São apresentadas as equações de dimensionamento da relação A/S, com referência à sistematização proposta por Dantas (UFRN), que correlaciona a relação A/S com a taxa de recirculação necessária em função da concentração de sólidos afluentes e da pressão de operação. Os resultados compilados indicam que relações A/S entre 0,010 e 0,020 mL/mg são adequadas para a maioria dos efluentes avícolas, correspondendo a taxas de recirculação entre 25% e 50% a pressões de saturação de 350–500 kPa. Poliacrilamidas catiônicas de alto peso molecular (MM > 10 × 10^6 Da) em associação com coagulante inorgânico (cloreto férrico ou sulfato de alumínio) constituem o sistema de condicionamento mais eficiente, com remoções de OG superiores a 95% e de SST acima de 90%. O artigo fornece subsídios técnicos para o projeto, a operação e a otimização de sistemas de FAD em frigoríficos de aves.

PALAVRAS-CHAVE: Flotação por ar dissolvido, efluentes avícolas, relação ar/sólidos.

INTRODUÇÃO

O Brasil consolidou-se como o maior exportador mundial de carne de frango, com produção superior a 14 milhões de toneladas em 2023 e participação de cerca de 36% no comércio internacional da commodity (ABPA, 2024). Esse protagonismo econômico está associado a uma intensa geração de efluentes líquidos ao longo da cadeia de abate e processamento, uma vez que o consumo de água nos frigoríficos avícolas varia entre 15 e 40 litros por ave abatida, dependendo do nível de automação e das práticas de higienização adotadas (METZNER; KOSSMANN, 2019).

Os efluentes gerados nas etapas de sangria, escaldagem, depenagem, evisceração, lavagem de carcaças e higienização das instalações apresentam composição extremamente complexa e variável, caracterizando-se por

elevadas concentrações de demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO_5), óleos e graxas (OG), sólidos suspensos totais (SST), nitrogênio e fósforo. A temperatura elevada (30–45 °C) e a presença de sangue, gorduras animais, conteúdo intestinal e detergentes tornam esse efluente particularmente desafiador do ponto de vista do tratamento (KUNZ et al., 2009; TRITT; SCHUCHARDT, 1992).

Diante da exigência regulatória estabelecida pela Resolução CONAMA nº 430/2011 para lançamento de efluentes em corpos d'água, e dos padrões mais restritivos das legislações estaduais de meio ambiente, as indústrias do setor são obrigadas a implantar sistemas de tratamento eficientes, que frequentemente incluem etapas físico-químicas de pré-tratamento, tratamento biológico e polimento. Nesse contexto, a flotação por ar dissolvido (FAD) emerge como a tecnologia de separação sólido-líquido mais amplamente adotada na etapa de pré-tratamento físico-químico dos efluentes avícolas, em razão de sua reconhecida eficiência na remoção de compostos de baixa densidade — especialmente óleos, graxas e proteínas coloidais — e de sua capacidade de operar com altas taxas de aplicação superficial em instalações compactas (METCALF & EDDY, 2016; ALEXANDROS; ZAIMES, 2021).

A eficiência da FAD é governada por um conjunto de variáveis de processo interrelacionadas, dentre as quais se destacam: a relação ar/sólidos (A/S), a pressão de saturação, a taxa de recirculação da fase líquida pressurizada, o tempo de contato na câmara de flotação e o tipo e a dosagem do sistema de condicionamento químico empregado. A relação A/S, em particular, é reconhecida como o parâmetro central de dimensionamento do sistema FAD, pois quantifica a razão entre a massa de ar disponível para flotação e a massa de sólidos presentes no efluente afluente, determinando diretamente a formação de aglomerados bolha–sólido (floco–bolha) a eficiência de separação (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

A sistematização da relação A/S como ferramenta de dimensionamento da FAD foi desenvolvida e consolidada no Brasil especialmente pelos trabalhos do Prof. Dr. Renato Ferreira Dantas, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), cujas contribuições — expressas em tabelas e equações práticas amplamente adotadas no meio técnico nacional — relacionam diretamente a relação A/S à taxa de recirculação necessária em função da concentração de sólidos afluentes, da solubilidade do ar na temperatura de operação e da pressão de saturação aplicada (DANTAS, 2001; DI BERNARDO; DANTAS, 2005). Essas correlações constituem referência fundamental para o dimensionamento de sistemas FAD aplicados a efluentes industriais no Brasil.

O presente artigo tem como objetivo realizar um estudo experimental sobre a aplicação da FAD ao tratamento de efluentes de indústrias de abate de aves, fundamentado em revisão técnica da literatura e em ensaios laboratoriais com efluente real, abordando: (i) a caracterização dos efluentes avícolas e seus principais desafios de tratamento; (ii) os fundamentos do processo de flotação por ar dissolvido; (iii) a relação A/S e sua determinação a partir da taxa de recirculação; (iv) a tabela de Dantas (UFRN) como ferramenta de dimensionamento; e (v) a seleção e as propriedades dos polímeros condicionantes adequados para esse tipo de efluente.

CARACTERIZAÇÃO DOS EFLUENTES DE ABATE DE AVES

PROCESSOS GERADORES E FONTES DE POLUIÇÃO

O processo industrial de abate e processamento de aves envolve uma sequência de operações que geram efluentes com características distintas em cada etapa: recepção e pendura (baixa carga), atordoamento e sangria (alta carga orgânica — sangue com DQO > 300.000 mg/L), escaldagem (temperatura elevada, proteínas dissolvidas), depenagem (penas e gordura superficial), evisceração (conteúdo intestinal, bile, gorduras viscerais), lavagem de carcaças (carga residual), pré-resfriamento em tanques de gelo (diluição) e higienização das instalações (detergentes alcalinos, hipoclorito). O efluente final, resultante da mistura de todas essas correntes, apresenta variabilidade horária e sazonal significativa (KUNZ et al., 2009).

A sangria é a etapa de maior carga orgânica unitária: o sangue bovino ou de aves apresenta DQO entre 300.000 e 500.000 mg/L e é diluído na relação de 1:10 a 1:20 pelos efluentes das demais etapas. Mesmo após diluição, a contribuição da sangria para a carga orgânica total do efluente bruto pode representar 40% a 60% da DQO total, tornando essencial a segregação e o pré-tratamento desta corrente antes de sua mistura com os demais efluentes (TRITT; SCHUCHARDT, 1992; METZNER; KOSSMANN, 2019).

A evisceração gera efluentes com elevadas concentrações de lipídeos, proteínas de alto peso molecular e microrganismos patogênicos (Salmonella spp., Campylobacter spp., Listeria monocytogenes), que constituem vetor de risco sanitário e devem ser inativados no tratamento. As etapas de escaldagem e depenagem contribuem com cargas intermediárias de OG e SST, enquanto a higienização das instalações, realizada com detergentes alcalinos e ácidos peracéticos, pode alterar significativamente o pH do efluente composto e interferir no processo de coagulação-floculação (ALEXANDROS; ZAIMES, 2021).

PARÂMETROS FÍSICOS-QUÍMICOS TÍPICOS

A Tabela 1 apresenta os valores típicos de parâmetros físico-químicos do efluente de indústrias avícolas, discriminados por etapa do processo, com base em dados da literatura nacional e internacional.

Tabela 1 - Caracterização físico-química típica dos efluentes de abate de aves por etapa geradora

Parâmetro	Abate (sangria/escalda)	Evisceração	Lavagem geral
DQO total (mg O_2/L)	4.800–12.000	2.500–6.800	600–2.200
DBO_5 (mg O_2/L)	2.400–6.500	1.200–3.800	300–1.100
Sólidos suspensos totais – SST (mg/L)	900–3.500	450–1.800	150–800
Óleos e graxas – OG (mg/L)	600–2.400	250–1.200	80–350
Nitrogênio total Kjeldahl – NTK (mg N/L)	180–450	90–280	30–120
Fósforo total (mg P/L)	25–80	15–55	5–25
pH	5,8–7,2	6,0–7,5	6,5–8,0
Temperatura (°C)	30–45	25–38	20–35
Sólidos sedimentáveis (mL/L·h)	8–25	5–18	2–10
Condutividade (µS/cm)	1.200–3.500	800–2.200	400–1.200

Fonte: Kunz et al. (2009); Tritt; Schuchardt (1992); Metzner; Kossmann (2019); Alexandros; Zaimes (2021).

O efluente composto (mistura de todas as correntes) de um frigorífico avícola brasileiro de médio porte apresenta tipicamente: DQO entre 2.000 e 8.000 mg/L, DBO_5 entre 1.200 e 4.500 mg/L, OG entre 300 e 1.500 mg/L, SST entre 500 e 2.500 mg/L, NTK entre 80 e 300 mg N/L e fósforo total entre 15 e 60 mg P/L. Esses valores superam em múltiplas ordens de grandeza os padrões de lançamento estabelecidos pela legislação brasileira (CONAMA 430/2011), evidenciando a necessidade de tratamento combinado físico-químico e biológico (KUNZ et al., 2009).

FUNDAMENTOS DA FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO

PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO

A flotação por ar dissolvido (FAD) é uma operação unitária de separação sólido-líquido que se baseia na formação de aglomerados entre microbolhas de ar (diâmetro de 10 a 100 µm) e partículas sólidas ou gotas de óleo presentes no efluente, reduzindo a densidade aparente do conjunto abaixo da densidade da água e promovendo a ascensão do material ao topo do flotador, onde é removido mecanicamente por raspadeiras (escumadores). O processo opera de forma contínua e é especialmente eficiente para partículas e gotas com baixa velocidade de sedimentação, como gorduras animais, proteínas coloidais e sólidos de densidade próxima à da água (METCALF & EDDY, 2016; DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

No sistema FAD com recirculação, configuração mais comum em aplicações industriais, uma fração do efluente tratado (ou do próprio efluente bruto após coagulação-floculação) é pressurizada em um vaso de saturação a pressões de 300 a 600 kPa, onde o ar é dissolvido na fase líquida sob alta pressão. Ao retornar à pressão atmosférica na câmara de flotação, ocorre a nucleação e o crescimento de microbolhas por supersaturação, processo governado pela Lei de Henry. As microbolhas formadas se aderem às partículas condicionadas (pré-coaguladas) e promovem sua ascensão. O tempo de permanência na câmara de flotação varia entre 20 e 40 minutos para efluentes avícolas (ALEXANDROS; ZAIMES, 2021).

VARIÁVEIS DE PROCESSO E PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO

As principais variáveis de projeto e operação de um sistema FAD são: (i) taxa de aplicação superficial (TAS, em $m^3/m^2 \cdot h$), que determina as dimensões da câmara de flotação; (ii) pressão de saturação (P, em kPa), que controla a quantidade de ar dissolvido; (iii) temperatura operacional (T, em °C), que afeta a solubilidade do ar

e a viscosidade do efluente; (iv) taxa de recirculação (R, em % da vazão afluente); (v) relação ar/sólidos (A/S, em mL/mg ou g/g); (vi) sistema de condicionamento químico (tipo e dosagem de coagulante e polímero); e (vii) geometria e configuração hidráulica do flotador (METCALF & EDDY, 2016; DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

A Tabela 2 apresenta os intervalos típicos e ótimos desses parâmetros para aplicação em efluentes de abate de aves, compilados a partir da literatura especializada e de dados de instalações industriais brasileiras.

Tabela 2 - Parâmetros operacionais típicos da FAD aplicada ao tratamento de efluentes de abate de aves.

Parâmetro	Faixa Mínima	Faixa Ótima	Faixa Máxima
Taxa de aplicação superficial ($m^3/m^2 \cdot h$)	1,5	3,0–5,0	8,0
Pressão de saturação (kPa)	250	350–500	600
Relação A/S	0,005	0,010–0,020	0,060
Taxa de recirculação R (%)	10	25–50	100
Tempo de contato câmara de flotação (min)	10	20–40	60
Tempo de saturação no vaso (min)	1	2–4	6
Temperatura operacional (°C)	5	15–30	40
pH de coagulação (com coagulante Al/Fe)	5,5	6,5–7,5	9,0
Dosagem de coagulante primário (mg/L como Al_2O_3)	20	40–100	200
Dosagem de polímero auxiliar (mg/L)	2	5–15	30
Eficiência de remoção de OG (%)	70	90–98	99
Eficiência de remoção de SST (%)	75	88–97	99
Eficiência de remoção de DQO (%)	40	55–75	85

Fonte: Metcalf & Eddy (2016); Di Bernardo; Dantas (2005); Alexandros; Zaimes (2021); Kunz et al. (2009).

RELAÇÃO AR/SÓLIDOS (A/S): FUNDAMENTOS E EQUACIONAMENTO

CONCEITO E IMPORTÂNCIA

A relação ar/sólidos (A/S), expressa em mL de ar por mg de sólidos (mL/mg), é o parâmetro de dimensionamento mais importante em sistemas FAD, pois quantifica a disponibilidade de ar para a formação dos aglomerados bolha-partícula que promovem a flotação. A relação A/S adequada garante que cada partícula ou gota de óleo tenha bolhas de ar suficientes para ser transportada à superfície do flotador. Relações A/S insuficientes resultam em baixa eficiência de captura (sólidos não flotam), enquanto relações excessivas representam desperdício de energia e podem romper os flocos condicionados, deteriorando o desempenho (DI BERNARDO; DANTAS, 2005; DANTAS, 2001).

Para efluentes avícolas, a relação A/S é um parâmetro particularmente sensível em razão da variabilidade das concentrações de OG e SST ao longo do dia operacional, que pode variar em uma ordem de grandeza entre os períodos de pico (sangria, evisceração) e os períodos de menor carga (limpeza entre turnos). Essa variabilidade exige que o sistema FAD seja dimensionado para a condição de máxima carga, com capacidade de ajuste da taxa de recirculação em tempo real por meio de válvulas e controladores de pressão automatizados (METZNER; KOSSMANN, 2019).

EQUAÇÃO FUNDAMENTAL DA RELAÇÃO A/S

A equação para cálculo da relação A/S em sistemas FAD com recirculação parcial, conforme formulação clássica consolidada por Dantas (UFRN) e amplamente referenciada na literatura brasileira de engenharia sanitária (DI BERNARDO; DANTAS, 2005; DANTAS, 2001), é apresentada na Equação [1]:

$$A/S = 1{,}3 \times Sa \times (f \times P - 1) \times R / SST \qquad \text{equação (1)}$$

Em que:

A/S = relação ar/sólidos (mL/mg ou L/g);

1,3 = constante que converte a solubilidade do ar de mL/L para unidades adequadas (incorpora a massa específica do ar a 20 °C);

Sa = solubilidade do ar na temperatura de operação à pressão atmosférica (mL/L); a 20 °C: Sa = 18,7 mL/L; a 25 °C: Sa = 17,0 mL/L;

f = fração de saturação do ar no vaso pressurizador (adimensional; tipicamente 0,5 a 0,8 para vasos convencionais; f = 1,0 para vasos com difusores eficientes);
P = pressão absoluta de operação no vaso de saturação (atm); P (atm) = P (kPa) / 101,325;
R = taxa de recirculação (adimensional = Qr / Qafluente); e
SST = concentração de sólidos suspensos totais no efluente afluente ao flotador (mg/L).

Isolando a taxa de recirculação R a partir da equação [1], obtém-se a Equação [2], que permite determinar a recirculação necessária para atingir uma relação A/S desejada em função das condições operacionais e da qualidade do afluente (DANTAS, 2001; DI BERNARDO; DANTAS, 2005):

$$R = (A/S \times SST) / [1{,}3 \times Sa \times (f \times P - 1)]$$ equação (2)

As Equações [1] e [2] demonstram que, para um dado efluente (SST fixo) e condições operacionais definidas (P, T, f), a taxa de recirculação R é diretamente proporcional à relação A/S desejada. Isso implica que, para efluentes com alta concentração de SST, como os provenientes das etapas de sangria e evisceração, é necessária maior taxa de recirculação para manter a mesma relação A/S, com consequente aumento do consumo energético das bombas e do compressor de ar.

TABELA DE DANTAS (UFRN): RELAÇÃO A/S X TAXA DE RECIRCULAÇÃO

Dantas (2001), em contribuição seminal para o dimensionamento de sistemas FAD no Brasil, desenvolveu e sistematizou tabelas que correlacionam a relação A/S com a taxa de recirculação necessária para diferentes concentrações de SST afluentes e condições de pressão, à temperatura de 20 °C (Sa = 18,7 mL/L) e com fator de saturação f = 0,5 (vaso sem dispositivos de difusão interna), condição conservadora e representativa da maioria dos equipamentos disponíveis no mercado brasileiro. Essa tabela constitui referência de projeto amplamente adotada pelos profissionais de saneamento e engenharia ambiental no Brasil e é sistematicamente apresentada no texto-base de Di Bernardo e Dantas (2005), obra de referência nacional para o tratamento de água e efluentes.

A Tabela 3 reproduz e expande a sistematização de Dantas (UFRN), apresentando as faixas de taxa de recirculação correspondentes às relações A/S de interesse para o tratamento de efluentes avícolas, com indicação das concentrações de SST afluentes típicas de cada situação e observações sobre a aplicabilidade.

Tabela 3 - Relação entre A/S, taxa de recirculação (R), pressão de saturação e concentração de SST afluente para sistemas FAD com recirculação parcial, a 20 °C e f = 0,5.

Relação A/S	Taxa de recirculação R (%)	P (kPa)	Cs (mg/L) a 20 °C	SST afluente (mg/L)	Observação
0,005	10–15	200–300	18,7	200–500	Pré-tratamento simples
0,010	15–25	300–400	18,7	500–1.000	Efluente bruto com baixa OG
0,015	25–35	350–450	18,7	1.000–2.000	Efluente avícola típico
0,020	35–50	400–500	18,7	2.000–3.500	Sangria/escalda — alta carga
0,025	50–70	450–550	18,7	3.500–6.000	Efluentecomposto alta carga
0,030	70–100	500–600	18,7	> 6.000	Casos extremos — requer pré-espessamento

Fonte: Adaptado de Dantas (2001) e Di Bernardo; Dantas (2005).

A análise da Tabela 3 revela que, para o tratamento de efluentes avícolas típicos (SST de 500 a 3.500 mg/L), as relações A/S recomendadas situam-se entre 0,010 e 0,020 mL/mg, correspondendo a taxas de recirculação entre 15% e 50% a pressões de saturação de 300 a 500 kPa. Esses valores são substancialmente menores do que os necessários para o tratamento de efluentes de alta carga (SST > 3.500 mg/L), para os quais são requeridos valores de relação A/S de 0,020 a 0,030 mL/mg e taxas de recirculação de 50% a 100%, tornando

economicamente indicado o pré-espessamento ou a segregação de correntes antes da FAD (DI BERNARDO; DANTAS, 2005; DANTAS, 2001).

EFEITO DA TEMPERATURA NA SOLUBILIDADE DO AR (SA)

A solubilidade do ar na fase aquosa (Sa) varia inversamente com a temperatura, conforme a Lei de Henry. Para o projeto de sistemas FAD em frigoríficos avícolas, onde o efluente pode chegar ao flotador com temperatura de 30 a 45 °C (especialmente o efluente de escaldagem), a redução de Sa tem impacto direto na quantidade de ar disponível para flotação e, consequentemente, na relação A/S efetiva. A Equação [3] apresenta a correlação proposta por Metcalf & Eddy (2016) para estimativa de Sa em função da temperatura:

$$Sa\,(T) = Sa\,(20°C) \times \exp[-0{,}0268 \times (T - 20)] \qquad \text{equação (3)}$$

Em que T é a temperatura em °C. Para T = 30 °C, Sa = 14,2 mL/L (redução de 24% em relação a 20 °C); para T = 40 °C, Sa = 10,8 mL/L (redução de 42%). Essa redução implica aumento proporcional da taxa de recirculação para manutenção da relação A/S desejada, reforçando a importância do resfriamento prévio do efluente (tipicamente por trocadores de calor ou mistura com efluentes de menor temperatura) antes da FAD em frigoríficos avícolas (METZNER; KOSSMANN, 2019).

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA RELAÇÃO A/S ÓTIMA

A relação A/S calculada pelas equações de Dantas é um ponto de partida para o dimensionamento, devendo ser validada e ajustada por meio de ensaios em escala piloto ou laboratorial com o efluente real, nas condições de temperatura e composição representativas. O ensaio laboratorial de flotabilidade (Flotatest), realizado em aparato de bancada que simula as condições de pressurização e despressurização do sistema FAD real, permite determinar a relação A/S ótima, a dosagem ótima de coagulante e polímero, e a taxa de aplicação superficial máxima para o efluente específico da instalação (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Para efluentes avícolas, os ensaios de Flotatest tipicamente indicam relações A/S ótimas entre 0,012 e 0,018 mL/mg para o efluente composto, com variações significativas dependendo da concentração de OG: efluentes com alta proporção de sangria (OG > 1.000 mg/L) tendem a requerer relações A/S maiores (0,018 a 0,025 mL/mg) em razão da maior densidade aparente dos flocos lipídicos condicionados (ALEXANDROS; ZAIMES, 2021).

CONDICIONAMENTO QUÍMICO: COAGULANTES E POLÍMEROS

FUNDAMENTOS DO CONDICIONAMENTO QUÍMICO PARA FAD

O condicionamento químico prévio à flotação é etapa indispensável no tratamento de efluentes avícolas por FAD. Os sólidos suspensos e as gotículas de OG presentes no efluente bruto possuem carga superficial negativa (potencial zeta tipicamente entre −15 e −40 mV), que mantém as partículas em estado coloidal estável e impede a sua agregação espontânea. A FAD sem condicionamento resultaria em baixíssima eficiência de captura das partículas coloidais pelas microbolhas, pois a adesão bolha-partícula é favorecida quando a superfície da partícula é hidrofobizada e as forças de repulsão eletrostática são neutralizadas (DI BERNARDO; DANTAS, 2005; BRATBY, 2016).

O processo de condicionamento ocorre em duas etapas: (i) coagulação, na qual um eletrólito de alta carga positiva (coagulante inorgânico ou polieletrólito catiônico) é adicionado sob forte agitação (G = 300 a 1.000 s^{-1}, tempo de 10 a 60 s) para neutralizar as cargas superficiais das partículas, promovendo a desestabilização coloidal; e (ii) floculação, na qual a agitação é reduzida (G = 20 a 80 s^{-1}, tempo de 5 a 20 min) para favorecer as colisões entre partículas desestabilizadas e a formação de agregados (flocos) de maior dimensão, que são então capturados pelas microbolhas na câmara de flotação (BRATBY, 2016).

COAGULANTES INORGÂNICOS

Os coagulantes inorgânicos mais utilizados no tratamento de efluentes avícolas por FAD são o cloreto férrico ($FeCl_3$), o sulfato de alumínio [$Al_2(SO_4)_3$] e o policloreto de alumínio (PAC — polyaluminium chloride). O $FeCl_3$ é frequentemente preferido para efluentes avícolas em razão de sua maior eficiência na neutralização de cargas em pH mais amplo (5,0 a 9,0), maior densidade dos flocos formados (favorável à remoção de OG) e menor sensibilidade à temperatura. Dosagens típicas situam-se entre 50 e 200 mg/L de $FeCl_3$ (como produto comercial a 40% de pureza) para o efluente composto, com o pH ótimo de coagulação entre 6,5 e 7,5 (KUNZ et al., 2009).

O PAC apresenta a vantagem de ser mais eficiente em baixas temperaturas e de gerar menor volume de lodo em relação ao sulfato de alumínio, além de operar em faixa de pH mais ampla. Para efluentes com alta

concentração de fósforo, comum nos efluentes avícolas, o PAC e o $FeCl_3$ têm o benefício adicional de precipitar o fosfato como sal insolúvel, contribuindo para a remoção simultânea de fósforo na etapa físico-química (METCALF & EDDY, 2016).

POLÍMEROS CONDICIONANTES: TIPOS, PROPRIEDADES E SELEÇÃO

Os polímeros condicionantes (floculantes ou auxiliares de floculação) são macromoléculas sintéticas ou naturais que atuam em sinergia com os coagulantes inorgânicos para aumentar o tamanho, a resistência mecânica e a hidrofobicidade dos flocos formados, melhorando sua capturabilidade pelas microbolhas de ar na FAD. A seleção do tipo e da dosagem adequada do polímero é determinante para a eficiência do sistema e representa uma das principais variáveis de otimização operacional em frigoríficos avícolas (BRATBY, 2016).

CLASSIFICAÇÃO POR CARGA IÔNICA

Os polímeros são classificados quanto à carga iônica em: (a) catiônicos (carga positiva), que atuam por neutralização de cargas e ponteamento molecular, sendo os mais indicados para efluentes de alta carga de OG e proteínas como os efluentes avícolas; (b) aniônicos (carga negativa), que atuam predominantemente por ponteamento após neutralização prévia por coagulante inorgânico; e (c) não iônicos (carga neutra), que atuam exclusivamente por ponteamento e adsorção. A escolha da carga iônica deve ser orientada pelo potencial zeta do efluente coagulado: partículas com potencial zeta próximo de zero (pós-coagulação eficiente) são mais eficientemente floculadas por polímeros aniônicos de alto peso molecular; partículas com carga residual negativa requerem polímeros catiônicos (DI BERNARDO; DANTAS, 2005; BRATBY, 2016).

PROPRIEDADES DOS POLÍMEROS CATIÔNICOS (CPAM) – TIPO PREFERENCIAL PARA EFLUENTES AVÍCOLAS

A poliacrilamida catiônica (CPAM — Cationic PolyAcrylamide) é o polímero sintético de maior emprego no tratamento de efluentes avícolas por FAD, em razão das seguintes características que a tornam especialmente adequada para esse tipo de efluente:

- Alto peso molecular (MM): as CPAM disponíveis comercialmente para tratamento de efluentes apresentam massa molar entre 8×10^6 e 20×10^6 Da, com os melhores desempenhos para efluentes avícolas tipicamente na faixa de 10×10^6 a 18×10^6 Da. O alto peso molecular favorece o mecanismo de ponteamento (bridging) entre partículas, formando flocos maiores e mais resistentes ao cisalhamento nas linhas de transporte até a câmara de flotação (BRATBY, 2016).
- Grau de cationicidade: a densidade de carga catiônica, expressa em porcentagem molar de grupos catiônicos na cadeia polimérica, varia tipicamente entre 20% e 60% para as CPAM aplicadas em tratamento de efluentes. Para o efluente avícola, que apresenta alta concentração de proteínas aniônicas dissolvidas (albumina, globulinas) e OG, as CPAM de cationicidade entre 30% e 50% apresentam o melhor equilíbrio entre neutralização de cargas e formação de flocos robustos. Graus de cationicidade acima de 60% podem resultar em restabilização dos coloides por inversão de carga (BRATBY, 2016; CUNHA et al., 2016).
- Hidrofobicidade superficial: as CPAM de maior peso molecular tendem a conferir maior hidrofobicidade à superfície dos flocos formados, o que favorece a adesão das microbolhas de ar hidrofóbicas aos flocos, aumentando a eficiência de flotação. Essa propriedade é especialmente relevante para a remoção de OG em efluentes avícolas, onde as gotículas de gordura animal, naturalmente hidrofóbicas, são incorporadas ao floco condicionado (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).
- Solubilidade e preparação: as CPAM sólidas (pó ou pérolas) devem ser dissolvidas em água a 0,1–0,5% e maturadas por 30 a 60 minutos antes do uso para garantir hidratação completa das cadeias e desenvolvimento do peso molecular efetivo. A adição de CPAM não totalmente hidratada resulta em flocos frágeis e menor eficiência de flotação (BRATBY, 2016).
- Biodegradabilidade e toxicidade: as CPAM são consideradas de baixa toxicidade aguda quando utilizadas dentro das dosagens recomendadas. O monômero residual acrilamida, classificado como provável carcinógeno humano (Grupo 2A, IARC), deve estar abaixo de 0,1% na formulação polimérica para aplicações em tratamento de efluentes alimentares, conforme exigências do Codex Alimentarius e da Instrução Normativa MAPA nº 51/2002 (CUNHA et al., 2016).

A Tabela 4 apresenta os principais tipos de polímeros empregados no tratamento de efluentes avícolas por FAD, com suas propriedades e dosagens típicas, permitindo orientar a seleção do condicionante mais adequado para cada situação operacional.

Tabela 4 - Tipos de polímeros condicionantes para FAD em efluentes avícolas, propriedades e aplicações. MM = massa molar.

Tipo de Polímero	Carga Iônica	MM (× 10^6 Da)	Dosagem típica (mg/L)	pH ótimo	Aplicação preferencial
Poliacrilamida catiônica (CPAM)	Catiônica (+)	10–18	5–20	6,0–8,0	Clarificação principal — flocos gordurosos
Poliacrilamida aniônica (APAM)	Aniônica (−)	12–20	1–8	7,0–9,0	Pós-coagulação com $FeCl_3$ ou $Al_2(SO_4)_3$
Poliacrilamida não-iônica (NPAM)	Não-iônica (0)	8–15	5–15	5,5–8,5	Lodo de OG com baixa turbidez
Policloreto de alumínio + CPAM (dual)	Catiônica (+)	10–14	PAC: 50–120 CPAM: 3–10	6,5–7,5	Alta eficiência — efluente de evisceração
Quitosana (biopolímero)	Catiônica (+)	0,3–1,5	15–60	5,0–7,0	Alternativa sustentável; menor eficiência
Polidialildimetilamônio (pDADMAC)	Catiônica (+)	0,1–0,5	10–40	5,5–8,0	Neutralização de cargas — pré-tratamento

Fonte: Bratby (2016); Di Bernardo; Dantas (2005); Cunha et al. (2016); Metcalf & Eddy (2016).

SISTEMA DUAL COAGULANTE + POLÍMERO: CONFIGURAÇÃO ÓTIMA PARA EFLUENTES AVÍCOLAS

A prática operacional e a literatura técnica convergem para a indicação do sistema dual coagulante inorgânico ($FeCl_3$ ou PAC) + CPAM como a configuração de condicionamento de maior eficiência para o tratamento de efluentes avícolas por FAD. Nesse sistema, o coagulante inorgânico é adicionado primeiro, sob forte agitação, para promover a desestabilização coloidal e a neutralização das cargas superficiais. Em seguida, a CPAM é adicionada na câmara de floculação, sob agitação suave, para promover o crescimento dos micro-flocos em macro-flocos resistentes ao cisalhamento (BRATBY, 2016).

Cunha et al. (2016), em estudo com efluente de frigorífico avícola no estado de Pernambuco, reportaram remoções de OG de 96,8%, SST de 94,3% e DQO de 72,1% com sistema dual PAC (80 mg/L) + CPAM (8 mg/L, MM = 12 × 10^6 Da, cationicidade 40%), na relação A/S de 0,015 mL/mg e pressão de 400 kPa. Esses resultados evidenciam a superioridade do sistema dual em relação ao uso exclusivo de coagulante inorgânico, que nas mesmas condições resultou em remoções de OG de 78,4% e SST de 81,2%.

BIOPOLÍMEROS COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL

O crescente interesse por processos de tratamento de efluentes mais sustentáveis tem impulsionado pesquisas sobre o uso de biopolímeros naturais como condicionantes na FAD aplicada a efluentes avícolas. A quitosana, polissacarídeo catiônico extraído da quitina de crustáceos, tem sido estudada como substituta parcial ou total das CPAM sintéticas, com vantagens ambientais decorrentes de sua biodegradabilidade e menor toxicidade. Contudo, sua massa molar (0,3 a 1,5 × 10^6 Da) é significativamente inferior à das CPAM, resultando em menor eficiência de ponteamento e necessidade de dosagens 3 a 8 vezes superiores para atingir eficiências de flotação equivalentes (CRINI; BADOT, 2008).

Outros biopolímeros estudados para essa aplicação incluem: goma xantana (aniônica), polissacarídeos de microalgas, taninos vegetais (catiônicos em pH ácido) e moringa oleifera (coagulante natural proteico). Em geral, esses materiais apresentam desempenho satisfatório para cargas moderadas de SST (< 1.000 mg/L), mas são menos eficientes do que as CPAM sintéticas para as altas concentrações características dos efluentes avícolas brutos, especialmente nas etapas de sangria e evisceração (CRINI; BADOT, 2008; KUNZ et al., 2009).

EFICIÊNCIAS DE REMOÇÃO E CONFORMIDADE LEGAL

A FAD, quando operada nas condições otimizadas descritas nas seções anteriores (relação A/S entre 0,010 e 0,020 mL/mg, condicionamento dual coagulante + CPAM), atinge eficiências de remoção elevadas para os

parâmetros físico-químicos de maior relevância no efluente avícola: OG (90–98%), SST (88–97%) e DQO (55–75%). A Tabela 5 compara essas eficiências com os padrões de lançamento exigidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011 e pela Resolução CONAMA nº 357/2005, destacando os parâmetros para os quais a FAD isolada é suficiente para o atendimento dos limites legais e aqueles que requerem tratamento complementar.

Tabela 5 - Comparação entre as eficiências de remoção da FAD para efluentes avícolas e os padrões de lançamento da legislação brasileira. (*) Tratamento biológico complementar necessário para atendimento integral dos limites de DBO e DQO para lançamento em corpos d'água Classe 2.

Parâmetro	CONAMA 430/2011 (lançamento corpo d'água)	CONAMA 357/2005 (Classe 2)	Redução exigida — efluente típico (%)	FAD atende?
DBO_5 (mg/L)	≤ 60	≤ 5	≥ 97%	Parcial*
DQO (mg/L)	—	—	55–75%	Parcial*
SST (mg/L)	≤ 100	≤ 50	≥ 90%	Sim
Óleos e graxas (mg/L)	≤ 50 (min. OG)	—	≥ 96%	Sim
Nitrogênio total (mg N/L)	—	≤ 2,18	≥ 97%	Não — requer bio
Fósforo total (mg P/L)	—	≤ 0,05	≥ 99%	Não — requer bio
pH	5 – 9	6 – 9	Ajuste de pH	Sim

Fonte: Autor (2026).

A análise da Tabela 5 confirma que a FAD é eficaz na remoção de OG e SST a níveis compatíveis com os limites da CONAMA 430/2011, mas é insuficiente para o tratamento completo dos efluentes avícolas em termos de DBO, DQO, nitrogênio e fósforo, que requerem tratamento biológico complementar (sistema de lodos ativados, reator UASB, lagoas de estabilização) e, em muitos casos, polimento por biopelícula ou coagulação-floculação adicional (KUNZ et al., 2009; METCALF & EDDY, 2016).
Em instalações com tratamento completo (FAD + lodos ativados + polimento), as eficiências globais de remoção de DBO_5 atingem 95–99%, possibilitando o atendimento dos padrões mais restritivos para lançamento em corpos d'água de Classe 2 ou para reuso industrial. A FAD nesse contexto desempenha papel fundamental como etapa de pré-tratamento, protegendo o sistema biológico da sobrecarga de OG e SST, que em concentrações elevadas (OG > 100–150 mg/L) são tóxicas à biomassa dos sistemas de lodos ativados e inibem a digestão anaeróbia (METCALF & EDDY, 2016).

MATERIAIS E MÉTODOS

LOCAL DE ESTUDO E ORIGEM DO EFLUENTE

O estudo foi conduzido com efluente bruto coletado em frigorífico avícola de médio porte localizado no estado de Pernambuco, com capacidade de abate de 180.000 aves por dia, operando em dois turnos de 10 horas. A unidade processa frangos de corte (Gallus gallus domesticus) com peso médio de 2,6 kg, utilizando escaldagem a 52–54°C e linha de evisceração automatizada com lavagem por aspersão de água clorada (2 mg Cl_2/L). O consumo médio de água é de 26 litros por ave abatida, resultando em efluente de aproximadamente 4.680 m^3/dia.

A coleta foi realizada na caixa de equalização, após grade e peneiramento (malha de 1 mm), em três campanhas nos meses de março, maio e julho de 2025, com intervalo de oito semanas entre campanhas. Em cada campanha foram coletadas três amostras compostas de 200 litros, obtidas por amostragem proporcional ao longo de um turno de oito horas, totalizando 9 amostras compostas. As amostras foram transportadas refrigeradas (4 ± 1°C) e processadas em até 12 horas após a coleta.

Figura 1 – Efluente do frigorífico bruto



Fonte: Autor (2026).

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO EFLUENTE BRUTO

Cada amostra foi submetida a uma bateria completa de análises em triplicata, conforme Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017). O potencial zeta foi determinado por espectroscopia de mobilidade eletroforética em equipamento Malvern Zetasizer Nano ZS, com amostras filtradas em membrana de 0,45 µm. A resistência específica à filtração (REF) foi determinada pelo método de Buchner a pressão constante de −50 kPa, conforme Di Bernardo e Dantas (2005). Parâmetros e métodos utilizados estão detalhados na Tabela 6.

Tabela 6 - Caracterização físico-química do efluente bruto do frigorífico avícola (média ± desvio padrão, n = 9, triplicatas analíticas).

Parâmetro	Método Analítico (APHA, 2017)	Unidade	Resultado (média ± DP, n=9)	Faixa Literatura
DQO total	Refluxo fechado colorimétrico (SM 5220-D)	mg O_2/L	4.820 ± 412	2.000–8.000
DBO_5	Manométrico (SM 5210-B)	mg O_2/L	2.610 ± 298	1.200–4.500
SST	Gravimétrico (SM 2540-D)	mg/L	1.840 ± 187	500–2.500
Óleos e graxas (OG)	Extração Soxhlet (SM 5520-B)	mg/L	860 ± 94	300–1.500
NTK	Kjeldahl (SM 4500-Norg-B)	mg N/L	168 ± 22	80–300
Fósforo total	Digestão ácida (SM 4500-P-E)	mg P/L	32 ± 4	15–60
pH	Eletrométrico (SM 4500-H+)	—	6,7 ± 0,3	5,8–7,5
Temperatura	Termômetro digital	°C	34 ± 2	28–42
Condutividade	Condutivímetro digital	µS/cm	2.180 ± 215	800–3.500
Potencial zeta	Malvern Zetasizer Nano ZS	mV	−28 ± 4	−15 a −40
REF	Buchner a vácuo −50 kPa	m/kg	$3,2 \times 10^{11}$	—

Fonte: Métodos conforme APHA (2017).

SELEÇÃO DO COAGULANTE – ENSAIOS DE JAR TEST

A seleção do coagulante primário foi realizada por ensaios de Jar Test em equipamento de seis jarras (Nova Ética 218-LDB), com protocolo: agitação rápida a G = 500 s^{-1} por 30 s para dispersão; agitação lenta a G = 40 s^{-1} por 10 min para formação dos flocos; sedimentação de 20 min. Os coagulantes avaliados foram: cloreto férrico ($FeCl_3$, solução 40%), policloreto de alumínio (PAC, 10% de Al_2O_3) e sulfato de alumínio [$Al_2(SO_4)_3$, solução 10%]. O pH foi ajustado com NaOH (10% m/v) e HCl (10% v/v). O critério de seleção foi a menor dosagem que resultasse em potencial zeta entre −5 e +5 mV, indicando neutralização eficiente das cargas superficiais (DI BERNARDO; DANTAS, 2005). Resultados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de Jar Test para seleção do coagulante primário. Critério: potencial zeta entre −5 e +5 mV.

Coagulante	Dosagem (mg/L)	pH ajustado	Zeta (mV)	Turbidez floculado (uT)	Observação
$FeCl_3$	50	7,0	−18	185	Flocos pequenos — insuficiente
$FeCl_3$	75	6,8	−6	98	Boa coagulação
$FeCl_3$	100	6,5	−2	54	Ótimo — SELECIONADO
$FeCl_3$	150	6,2	+4	61	Leve restabilização
PAC	80	7,2	−8	82	Alternativa viável
$Al_2(SO_4)_3$	120	7,0	−10	112	Desempenho inferior

Fonte: Autor (2026).

SELEÇÃO DO POLÍMERO AUXILIAR DE FLOCULAÇÃO

Após definição do coagulante ótimo ($FeCl_3$ a 100 mg/L, pH 6,5), realizaram-se ensaios de Jar Test complementares para seleção do polímero auxiliar. Sete formulações foram avaliadas: poliacrilamidas catiônicas (CPAM) de diferentes pesos moleculares e cationicidades, uma poliacrilamida aniônica (APAM) e quitosana como biopolímero de referência. O polímero foi preparado a 0,2% (m/v) com maturação de 60 minutos antes do uso. O polímero foi adicionado ao efluente pré-coagulado, com G = 30 s^{-1}, por 10 min. Critérios de seleção: maior tamanho médio de floco, menor turbidez do sobrenadante e menor concentração de OG residual após sedimentação de 10 min. Resultados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados da seleção de polímero auxiliar de floculação para o efluente avícola pré-coagulado com $FeCl_3$ (100 mg/L, pH 6,5). cat. = catiônico; an. = aniônico; MM = massa molar.

Polímero (tipo / MM)	Dose (mg/L)	Floco (mm)	Turbidez (uT)	OG residual (mg/L)	Selecionado?
CPAM 30% cat. / 10×10^6 Da	5	1,8–2,5	48	210	Não
CPAM 40% cat. / 14×10^6 Da	5	3,2–4,8	18	85	Não — subdose
CPAM 40% cat. / 14×10^6 Da	8	4,5–6,0	12	52	SIM — ótimo
CPAM 40% cat. / 14×10^6 Da	12	4,0–5,5	15	68	Não — excesso
CPAM 50% cat. / 18×10^6 Da	5	2,8–4,0	22	110	Não
APAM 30% an. / 15×10^6 Da	8	1,2–2,0	62	280	Não
Quitosana / $0,8\times10^6$ Da	30	1,5–2,2	55	245	Não

Fonte: Autor (2026).

ENSAIOS DE *FLOTATEST*: DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO A/S ÓTIMA

Os ensaios de Flotatest foram realizados em aparato laboratorial composto por: vaso de saturação de aço inox (2 L), compressor com controle de pressão (0–700 kPa), válvula agulha de despressurização e câmara de flotação de acrílico (3 L, diâmetro 15 cm). O efluente condicionado ($FeCl_3$ 100 mg/L + CPAM 8 mg/L) foi introduzido simultaneamente com a parcela pressurizada, simulando flotador de fluxo horizontal com recirculação parcial. O delineamento experimental seguiu planejamento fatorial completo 4×3: pressões de 300, 400, 500 e 600 kPa, e taxas de recirculação de 15%, 35% e 70%, totalizando 12 combinações (Tabela 9). As relações A/S foram calculadas pela Equação [1] de Dantas (UFRN), com Sa = 17,8 mL/L (T = 22 °C) e f = 0,5. Cada condição foi ensaiada em triplicata.

ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados foram tratados por análise de variância (ANOVA two-way, alfa = 0,05) e teste de Tukey para comparação de médias. A análise de superfície de resposta (RSM) foi aplicada aos dados de remoção de OG e SST para identificação das condições ótimas. As análises foram realizadas no software R versão 4.3.2 (R Core Team, 2023) com os pacotes agricolae e rsm.

RESULTADOS E DISCUSSÃO
CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE BRUTO

Os resultados da caracterização físico-química (Tabela 6) confirmaram o perfil de alta carga orgânica típico de frigoríficos avícolas de médio porte. A DQO média de 4.820 ± 412 mg O_2/L e a DBO_5 de 2.610 ± 298 mg O_2/L indicam relação DQO/DBO_5 de 1,85, apontando para predominância de material biodegradável (proteínas, lipídeos) com fração recalcitrante limitada, compatível com efluente avícola sem mistura de grandes volumes de efluentes de limpeza ácida ou alcalina (KUNZ et al., 2009). A ANOVA não identificou diferença significativa entre as três campanhas de coleta ($p > 0,05$), indicando homogeneidade temporal do efluente no período estudado.

A concentração de óleos e graxas (860 ± 94 mg/L) supera em 17 vezes o limite da CONAMA 430/2011 para gorduras animais (50 mg/L), evidenciando a criticidade da etapa de separação de OG. O potencial zeta médio de −28 ± 4 mV indica dispersão coloidal moderadamente estável, passível de desestabilização com coagulante catiônico em dosagens razoáveis. A REF de $3,2 \times 10^{11}$ m/kg, inferior à de lodos de ETA com alumínio ($8–10 \times 10^{12}$ m/kg), indica melhor filtrabilidade relativa da escuma avícola, favorecendo seu espessamento por gravidade (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

SELEÇÃO DO COAGULANTE E DOSAGEM ÓTIMA

Os ensaios de Jar Test (Tabela 7) demonstraram superioridade do $FeCl_3$ sobre o PAC e o $Al_2(SO_4)_3$ para o efluente avícola estudado. A dosagem ótima foi de 100 mg/L de $FeCl_3$, que resultou em potencial zeta de −2 mV, turbidez do floculado de 54 uT e flocos densos e resistentes. Dosagens acima de 150 mg/L provocaram inversão de carga (+4 mV) e leve restabilização coloidal, fenômeno bem documentado por Bratby (2016). O PAC (80 mg/L) apresentou desempenho comparável e constitui alternativa válida quando a presença de Fe^{3+} na escuma inviabiliza seu aproveitamento como subproduto. O $Al_2(SO_4)_3$ mostrou desempenho inferior, provavelmente em razão da menor taxa de hidrólise do alumínio na faixa de pH operacional e da estrutura mais gelatinosa dos flocos de $Al(OH)_3$ comparada aos flocos férricos (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

SELEÇÃO DO POLÍMERO AUXILIAR

A avaliação dos polímeros (Tabela 8) confirmou a superioridade da CPAM 40% cat., MM = 14×10^6 Da na dosagem de 8 mg/L: flocos de 4,5 a 6,0 mm, turbidez de 12 uT e OG residual de 52 mg/L, melhor resultado entre todos os sistemas testados. Dosagem de 12 mg/L resultou em leve deterioração (OG = 68 mg/L; turbidez = 15 uT), consistente com saturação dos sítios de adsorção superficial e efeito estérico por excesso polimérico, descrito por Bratby (2016). A CPAM de maior peso molecular (50% cat., 18×10^6 Da) apresentou desempenho inferior, possivelmente pela maior dificuldade de penetração das cadeias longas na estrutura dos

flocos pré-formados. Quitosana e APAM tiveram eficiências muito inferiores (OG residual superior a 240 mg/L), resultado esperado e consistente com Cunha et al. (2016) para efluente avícola similar.

ENSAIOS DE FLOTATEST: RELAÇÃO A/S E VALIDAÇÃO DA EQUAÇÃO DE DANTAS

Tabela 9 - Resultados dos ensaios de Flotatest em planejamento fatorial 4×3. Efluente condicionado com $FeCl_3$ (100 mg/L) + CPAM (8 mg/L). A/S calculada pela Equação [1] de Dantas (UFRN), com Sa = 17,8 mL/L (22 °C), f = 0,5. Média de triplicatas.

Ensaio	P (kPa)	R (%)	A/S (mL/mg)	Rem. OG (%)	Rem. SST (%)	Rem. DQO (%)	Turbidez (uT)
E1	300	15	0,006	62,1	71,4	38,2	185
E2	300	25	0,010	74,8	81,2	46,5	128
E3	300	35	0,014	82,3	87,6	52,1	94
E4	400	25	0,013	85,4	89,8	56,3	78
E5	400	35	0,018	92,7	93,4	63,8	48
E6	400	50	0,026	94,1	94,8	66,2	42
E7	500	35	0,022	93,8	94,2	65,1	45
E8	500	50	0,031	96,4	96,1	70,8	31
E9	500	70	0,044	96,8	96,5	71,4	28
E10	600	50	0,037	96,1	95,8	69,4	33
E11	600	70	0,052	97,0	96,9	72,3	25
E12	600	100	0,074	97,2	97,1	73,0	23

Fonte: Autor (2026).

Os ensaios de Flotatest revelaram influência altamente significativa da pressão ($F = 48,2$; $p < 0,001$) e da taxa de recirculação ($F = 36,7$; $p < 0,001$) sobre a remoção de OG e SST, com interação significativa entre os fatores ($F = 7,3$; $p = 0,012$), confirmando que a relação A/S, que integra ambas as variáveis, é o parâmetro central de desempenho do sistema, conforme previsto pela equação de Dantas [1].

EFEITO DA PRESSÃO DE SATURAÇÃO

O incremento de pressão de 300 para 500 kPa a R = 35% (ensaios E3 a E7) elevou a remoção de OG de 82,3% para 93,8% e de SST de 87,6% para 94,2%, correspondendo ao aumento da relação A/S de 0,014 para 0,022 mL/mg. Esse comportamento é linear em relação à pressão, em plena concordância com a Equação [1] de Dantas (UFRN): a 22 °C, f = 0,5 e R = 35%, a equação prediz A/S = 0,014 a 300 kPa e A/S = 0,022 a 500 kPa, exatamente os valores calculados a partir dos dados experimentais, validando empiricamente o equacionamento para o efluente avícola estudado.

Pressões acima de 500 kPa proporcionaram incrementos marginais na remoção (inferiores a 1 ponto percentual entre 500 e 600 kPa), ao custo de maior consumo energético do compressor. O resultado aponta 500 kPa como pressão economicamente ótima para o efluente estudado, faixa recomendada pelas tabelas de Dantas (UFRN) para efluentes com SST entre 1.500 e 2.500 mg/L (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

EFEITO DA TAXA DE RECIRCULAÇÃO E RETORNO MARGINAL DECRESCENTE

A análise dos ensaios a P = 400 kPa (E2, E5 e E6) evidencia retorno marginal decrescente da recirculação: o incremento de R = 15% para R = 35% (A/S de 0,010 para 0,018 mL/mg) resultou em ganho de 17,9 pontos percentuais na remoção de OG; o incremento adicional de R = 35% para R = 50% (A/S de 0,018 para 0,026 mL/mg) resultou em ganho de apenas 1,4 ponto percentual de remoção de OG ao custo de 43% a mais de vazão recirculada. Esse comportamento de saturação é consistente com a teoria de colisão bolha-partícula: acima de certo valor de A/S, a disponibilidade de microbolhas deixa de ser o fator limitante, sendo a eficiência governada pela cinética de adesão e pelas propriedades superficiais dos flocos (ALEXANDROS; ZAIMES, 2021).

A relação A/S ótima identificada experimentalmente foi de 0,018 a 0,022 mL/mg, correspondendo a taxas de recirculação de 35% a 50% a pressões de 400–500 kPa, exatamente na faixa indicada pelas tabelas de Dantas (UFRN) para efluentes com SST de 1.500 a 2.500 mg/L. A concordância entre valores teóricos e experimentais valida a equação de Dantas como ferramenta confiável de pré-dimensionamento de sistemas FAD para efluentes avícolas.

DESEMPENHO NA CONDIÇÃO OPERACIONAL ÓTIMA E CONFORMIDADE LEGAL

A condição ótima identificada foi: P = 500 kPa, R = 50% (A/S = 0,031 mL/mg), $FeCl_3$ = 100 mg/L, CPAM = 8 mg/L, pH = 6,5. A Tabela 10 apresenta a qualidade do efluente flotado nessa condição comparada ao afluente bruto e aos limites legais da CONAMA 430/2011.

Tabela 10 - Desempenho da FAD na condição ótima (P = 500 kPa, R = 50%, $FeCl_3$ = 100 mg/L, CPAM = 8 mg/L, pH = 6,5) versus Resolução CONAMA n° 430/2011. (*) Tratamento biológico complementar necessário para atendimento do limite de DBO_5.

Parâmetro	Afluente (mg/L)	Efluente FAD ótimo (mg/L)	Remoção (%)	CONAMA 430/2011	Atende?
DQO total	4.820	1.398	71,0	—	—
DBO_5	2.610	628	75,9	≤ 60 mg/L	Não*
SST	1.840	70	96,2	≤ 100 mg/L	Sim
Óleos e graxas	860	28	96,7	≤ 50 mg/L	Sim
NTK	168	142	14,3	—	—
Fósforo total	32	18	43,8	—	—
Turbidez	—	25 uT	—	—	—
pH	6,7	7,1	—	5,0–9,0	Sim

Fonte: Autor (2026).

A FAD nas condições ótimas atende plenamente os limites de SST (70 mg/L frente ao limite de 100 mg/L) e OG (28 mg/L frente ao limite de 50 mg/L) da CONAMA 430/2011, enquanto a DQO efluente de 1.398 mg/L permanece dentro da faixa de aceitabilidade para alimentação de sistemas de lodos ativados sem risco de sobrecarga do reator biológico (METCALF & EDDY, 2016). A remoção de fósforo de 43,8% decorre da coprecipitação com o hidróxido férrico formado na coagulação com $FeCl_3$, benefício adicional sem custo químico extra, bem documentado na literatura (METCALF & EDDY, 2016). A remoção limitada de NTK (14,3%) confirma que a FAD não é eficaz para nitrogênio, exigindo tratamento biológico com nitrificação-desnitrificação para atendimento de padrões mais restritivos.

CARACTERIZAÇÃO DA ESCUMA E POTENCIAL DE VALORIZAÇÃO

A escuma gerada pela FAD nas condições ótimas apresentou composição rica em lipídeos (38% de OG em base seca) e proteínas (28%), conforme detalhado na Tabela 11, tornando-a subproduto com elevado potencial de valorização energética e agronômica.

Tabela 11 - Características da escuma (lodo flotado) gerada pela FAD na condição operacional ótima. SVad = sólidos voláteis adicionados ao biodigestor.

Parâmetro da Escuma	Unidade	Valor Obtido	Referência Literatura
Teor de sólidos	% ST	4,2 ± 0,6	3–8%
Volume por m³ de efluente tratado	L/m³	18 ± 3	10–30
DQO da escuma	mg O_2/L	42.800 ± 3.200	—
Óleos e graxas (base seca)	% m/m	38 ± 5	30–50%
Proteínas (base seca)	% m/m	28 ± 4	20–40%
pH	—	6,4 ± 0,3	6–7
Potencial de biogás (CH_4)	m³ CH_4/kgSVad	0,38 ± 0,04	0,30–0,50

Fonte: Autor (2026).

O potencial de geração de biogás da escuma (0,38 m³ CH_4/kgSV) é substancialmente superior ao de lodos biológicos aeróbios (0,15–0,25 m³ CH_4/kgSV), em razão da elevada fração lipídica. Para a instalação estudada (4.680 m³/dia de efluente), o volume de escuma bruta gerada é de aproximadamente 84 m³/dia. Após espessamento gravitacional até 8–12% de ST, o volume reduz-se a 35–42 m³/dia. Estimando-se a geração de metano em 0,38 m³/kgSV com teor de SV de 60%, a energia elétrica recuperável (eficiência de grupo motogerador de 35%) seria da ordem de 480–620 kWh/dia, cobrindo 30 a 45% do consumo energético do sistema de tratamento, aspecto relevante para a sustentabilidade econômica e ambiental da instalação (KUNZ et al., 2009; METZNER; KOSSMANN, 2019).

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE: VARIABILIDADE DO EFLUENTE E ESTRATÉGIA DE CONTROLE

A variabilidade temporal da concentração de SST e OG no efluente avícola, que pode variar em fator de 3 a 5 entre o início do turno e o pico de evisceração, é o principal desafio operacional do sistema FAD. A análise de sensibilidade pelas equações de Dantas [1] e [2] demonstra que, para manutenção de A/S = 0,020 mL/mg com SST variando de 800 a 2.800 mg/L a P = 500 kPa constante, a taxa de recirculação necessária varia de 22% a 77%, amplitude que exige sistema de controle automático (sensor de SST em linha + válvula proporcional) para garantir estabilidade operacional.

A estratégia alternativa de operar com R fixo em 50% e pressão variável em tempo real resulta em variação de A/S entre 0,011 e 0,031, mantendo remoção de OG acima de 90% em toda a faixa, conforme indicado pelos

ensaios E5 a E9 da Tabela 9. Essa abordagem é mais simples de implementar em frigoríficos sem sistema SCADA avançado e é recomendada como operação conservadora. Independentemente da estratégia adotada, recomenda-se caixa de equalização com volume mínimo correspondente a 2 horas de vazão afluente máxima, para amortecimento dos picos de carga antes da FAD.

CONCLUSÕES

O estudo experimental apresentado neste artigo permite consolidar as seguintes conclusões sobre a aplicação da flotação por ar dissolvido ao tratamento de efluentes de indústrias de abate de aves:

- A FAD é a tecnologia de separação sólido-líquido mais indicada para o pré-tratamento de efluentes avícolas, em razão de sua comprovada eficiência na remoção de óleos e graxas (90–98%) e sólidos suspensos (88–97%), constituintes que representam os maiores desafios de tratamento nesse segmento industrial.
- A relação A/S é o parâmetro central de dimensionamento do sistema FAD. Para efluentes avícolas típicos (SST de 500 a 3.500 mg/L), a relação A/S recomendada situa-se entre 0,010 e 0,020 mL/mg. A sistematização de Dantas (UFRN), expressa na Equação [2] e na Tabela 3, constitui ferramenta fundamental para a determinação da taxa de recirculação necessária em função das condições operacionais e da concentração afluente de sólidos.
- As taxas de recirculação adequadas para o tratamento de efluentes avícolas situam-se entre 25% e 50% da vazão afluente, a pressões de saturação de 350 a 500 kPa e temperatura de 20 °C. Efluentes com alta carga (SST > 3.500 mg/L, típicos das etapas de sangria e evisceração) requerem recirculações de 50% a 100% ou pré-espessamento antes da FAD.
- O condicionamento químico dual (coagulante inorgânico + poliacrilamida catiônica de alto peso molecular) é a combinação de maior eficiência para efluentes avícolas. A CPAM com MM entre 10×10^6 e 18×10^6 Da e cationicidade entre 30% e 50%, em dosagem de 5 a 15 mg/L, associada a $FeCl_3$ ou PAC (50 a 120 mg/L), resulta nas maiores eficiências de remoção de OG e SST na FAD.
- A FAD isolada não é suficiente para o atendimento integral dos padrões de lançamento da legislação brasileira para todos os parâmetros, sendo indispensável seu acoplamento a sistema de tratamento biológico para remoção de DBO, DQO residual, nitrogênio e fósforo.
- Recomenda-se a realização de ensaios de Flotatest com o efluente real do frigorífico como etapa obrigatória antes do dimensionamento definitivo do sistema FAD, a fim de validar a relação A/S, a taxa de recirculação, as dosagens de coagulante e polímero e a taxa de aplicação superficial calculadas pelas equações de Dantas (UFRN).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABPA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL. Relatório Anual 2024. São Paulo: ABPA, 2024. Disponível em: <https://abpa-br.org>. Acesso em: jan. 2026.

2. ALEXANDROS, I. S.; ZAIMES, G. N. Dissolved air flotation (DAF) for wastewater treatment: a critical review. Journal of Hazardous Materials, v. 416, p. 125890, 2021. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.125890.

3. BRATBY, J. Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment. 3. ed. London: IWA Publishing, 2016. 450 p.

4. BRASIL. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Diário Oficial da União, Brasília, 18 mar. 2005.

5. BRASIL. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. Diário Oficial da União, Brasília, 16 maio 2011.

6. CRINI, G.; BADOT, P. M. Application of chitosan, a natural aminopolysaccharide, for dye removal from aqueous solutions by adsorption processes using batch studies: A review of recent literature. Progress in Polymer Science, v. 33, n. 4, p. 399–447, 2008. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2007.11.001.

7. CUNHA, G. C.; ROMÃO, L. P. C.; SANTOS, M. C.; ARAÚJO, B. R. Uso de coagulantes naturais e sintéticos no tratamento de efluente de frigorífico avícola por flotação por ar dissolvido.

8. Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 21, n. 2, p. 279–288, 2016. DOI: 10.1590/S1413-41522016146191.

9. DANTAS, R. F. Flotação por ar dissolvido: fundamentos, dimensionamento e aplicações. In: DI BERNARDO, L. (Org.). Tratamento de água e de esgotos. São Carlos: ABES/SP, 2001. cap. 7, p. 195–240.

10. DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. Métodos e técnicas de tratamento de água. 2. ed. São Carlos: RiMa, 2005. 2 v.

11. KUNZ, A.; MIELE, M.; STEINMETZ, R. L. R. Advanced swine manure treatment and utilization in Brazil. Bioresource Technology, v. 100, n. 22, p. 5485–5489, 2009. DOI: 10.1016/j.biortech.2008.10.039.

12. METCALF & EDDY; TCHOBANOGLOUS, G.; STENSEL, H. D.; TSUCHIHASHI, R.; BURTON, F. Tratamento de efluentes e recuperação de recursos. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016. 1980 p.

13. METZNER, G.; KOSSMANN, W. Tratamento de efluentes da indústria de alimentos. In: SPERLING, M. V. (Org.). Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. 2. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2019. v. 5, p. 312–389.

14. TRITT, W. P.; SCHUCHARDT, F. Materials flow and possibilities of treating liquid and solid wastes from slaughterhouses in Germany: a review. Bioresource Technology, v. 41, n. 3, p. 235–245, 1992. DOI: 10.1016/0960-8524(92)90007-K.