

AVALIAÇÃO DE COAGULANTE POLISSACARÍDICO CATIÔNICO PARA A OTIMIZAÇÃO DO TRATAMENTO DE EFLUENTES OLEOSOS DA REFINARIA DE MANAUS (REAM) – QQS COA S

EVALUATION OF A CATIONIC POLYSACCHARIDE COAGULANT FOR OPTIMIZING THE TREATMENT OF OILY EFFLUENTS FROM THE MANAUS REFINERY (REAM) – QQS COA S

EVALUACIÓN DE UN COAGULANTE POLISACÁRIDO CATIÓNICO PARA OPTIMIZAR EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES OLEOSOS DE LA REFINERÍA DE MANAUS (REAM) – QQS COA S



10.56238/MultiCientifica-084

Fernando André de Oliveira Duarte

RESUMO

Este relatório técnico-científico detalha os resultados de um estudo de tratabilidade conduzido com efluentes oleosos de uma refinaria no Norte do Brasil (REAM), focando na avaliação de um coagulante orgânico de alta performance, o QQS COA S, um polissacarídeo à base de amido modificado com grupamentos catiônicos. O objetivo central foi comparar sua eficiência com o tratamento convencional da refinaria, que emprega um coagulante à base de tanino com um consumo diário de aproximadamente 200 kg, auxiliado por cerca de 2 kg de um polímero floculante. Os ensaios, realizados em equipamento Jar Test, simularam as condições de coagulação e floculação, revelando que o QQS COA S, em dosagens na faixa de 10 a 30 ppm, promove uma clarificação e separação de fases (água/óleo/sólidos) visualmente superior à obtida com aproximadamente 60 ppm do coagulante de tanino. Esta redução de dosagem, superior a 50%, é justificada pela estrutura macromolecular do amido catiônico e seus mecanismos de ação, que incluem neutralização de carga e formação de pontes interpartículas, eficientes na quebra da emulsão óleo-em-água. O estudo conclui que a substituição do tanino pelo amido catiônico representa uma oportunidade estratégica para, com potencial para uma drástica redução de custos operacionais, otimização logística, e um avanço significativo em sustentabilidade ambiental, alinhando a prática com a teoria fundamental da química de coloides e polímeros e incentivando a produção local de insumos de alto valor agregado.

Palavras-chave: Tratamento de Efluentes. Refinaria de Petróleo. Água Oleosa. Coagulantes Orgânicos. Amido Catiônico.

ABSTRACT

This technical-scientific report details the results of a treatability study conducted with effluents from the Manaus Refinery (REAM), focusing on the evaluation of a high-performance organic coagulant, QQS COA S, a starch-based polysaccharide modified with cationic groups. The main objective was to compare its efficiency with the conventional treatment of the refinery, which employs a tannin-based coagulant with a daily consumption of approximately 200 kg, aided by about 2 kg of a flocculant polymer. The assays, carried out in Jar Test equipment, simulated the coagulation and flocculation conditions, revealing that the QQS COA S, in dosages in the range of 10 to 30 ppm, promotes a



clarification and phase separation (water/oil/solids) visually superior to that obtained with approximately 60 ppm of the tannin coagulant. This dose reduction, greater than 50%, is justified by the macromolecular structure of cationic starch and its mechanisms of action, which include charge neutralization and formation of interparticle bridges, efficient in breaking the oil-in-water emulsion. The study concludes that the replacement of tannin by cationic starch represents a strategic opportunity, with the potential for a drastic reduction of operating costs, logistics optimization, and a significant advance in environmental sustainability, aligning the practice with the fundamental theory of colloid and polymer chemistry and encouraging the local production of high value-added inputs.

Keywords: Effluent Treatment. Oil Refinery. Oily Water. Organic Coagulants. Cationic Starch.

RESUMEN

Este informe técnico-científico detalla los resultados de un estudio de tratabilidad realizado con efluentes oleosos de una refinería del norte de Brasil (REAM), centrado en la evaluación de un coagulante orgánico de alto rendimiento, QQS COA S, un polisacárido a base de almidón modificado con grupos catiónicos. El objetivo principal fue comparar su eficiencia con el tratamiento convencional de la refinería, que emplea un coagulante a base de taninos con un consumo diario de aproximadamente 200 kg, asistido por aproximadamente 2 kg de un polímero floculante. Las pruebas, realizadas en un aparato de prueba de jarras, simularon las condiciones de coagulación y floculación, revelando que QQS COA S, en dosis de 10 a 30 ppm, promueve una clarificación y separación de fases (agua/aceite/sólidos) visualmente superiores en comparación con las obtenidas con aproximadamente 60 ppm del coagulante a base de taninos. Esta reducción de dosis, superior al 50%, se justifica por la estructura macromolecular del almidón catiónico y sus mecanismos de acción, que incluyen la neutralización de cargas y la formación de puentes interpartículas, eficientes para romper la emulsión de aceite en agua. El estudio concluye que la sustitución del tanino por almidón catiónico representa una oportunidad estratégica, con el potencial de una drástica reducción de costos operativos, optimización logística y un avance significativo en la sostenibilidad ambiental, alineando la práctica con la teoría fundamental de la química de coloides y polímeros e impulsando la producción local de insumos de alto valor añadido.

Palabras clave: Tratamiento de Aguas Residuales. Refinería de Petróleo. Aguas Aceitosas. Coagulantes Orgánicos. Almidón Catiónico.



1 INTRODUÇÃO

O tratamento de efluentes em refinarias de petróleo é uma operação crítica que visa mitigar o impacto ambiental da indústria e garantir a conformidade com normativas ambientais rigorosas, como a Resolução CONAMA nº 430/2011 no Brasil [1]. Estes efluentes, comumente designados como águas oleosas, são emulsões complexas de óleo em água (O/W), estabilizadas por surfactantes naturais e aditivos de processo, e carregadas com sólidos suspensos, compostos orgânicos dissolvidos (fenóis, benzeno, hidrocarbonetos poliaromáticos - HPAs) e íons inorgânicos [2, 3]. A quebra dessa emulsão e a remoção da fase dispersa são os objetivos primordiais do tratamento físico-químico, onde a etapa de coagulação-floculação desempenha um papel central [4].

A Refinaria em que foi feito o ensaio emprega atualmente um coagulante orgânico à base de tanino. Embora os coagulantes naturais sejam preferíveis aos sais metálicos inorgânicos (ex: sulfato de alumínio, cloreto férrico) por razões de sustentabilidade e menor geração de lodo tóxico [5], a aplicação na refinaria, conforme informado pela operação, representa um consumo diário elevado. Assumindo a vazão mínima de **150 m³/h** (3.600 m³/dia), a dosagem do tanino (200 L/dia, densidade ~1 kg/L) é de aproximadamente 56 ppm. Tal dosagem não apenas eleva exponencialmente os custos operacionais (OPEX), mas também sobrecarrega o sistema com uma carga orgânica adicional, complexifica a logística e o manuseio de produtos, e pode impactar negativamente o gerenciamento do lodo gerado [6].

Neste cenário, a busca por alternativas mais eficientes e sustentáveis é imperativa. Este relatório apresenta um estudo aprofundado sobre a aplicação do QQS COA S, um coagulante polissacarídico à base de amido catiônico, como uma solução de alta performance para o tratamento do efluente oleoso da refinaria. A hipótese central é que a estrutura macromolecular única do amido catiônico, combinada com sua alta densidade de carga, permite uma desestabilização coloidal e aglomeração de partículas muito mais eficiente, validando na prática o que a teoria da química de polímeros e coloides prevê. O estudo visa não apenas demonstrar a superioridade técnica e econômica do amido catiônico, mas também fornecer um embasamento científico robusto que justifique a transição tecnológica e fomenta a discussão sobre o potencial estratégico da produção local deste insumo de alto valor agregado na região amazônica.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para compreender a magnitude dos resultados obtidos, é essencial aprofundar nos princípios químicos e físicos que governam a coagulação de efluentes oleosos e na estrutura molecular dos coagulantes em questão.



2.1 QUÍMICA DOS COAGULANTES ORGÂNICOS

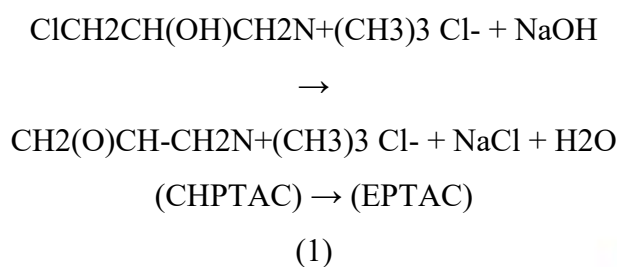
2.1.1 Amido Catiônico (QQS COA S)

O amido é um polissacarídeo natural, abundante e biodegradável, composto por unidades de D-glicose. Ele consiste em duas macromoléculas: a amilose (cadeia linear) e a amilopectina (cadeia ramificada). Em seu estado natural, o amido não possui carga iônica significativa, o que o torna ineficaz como coagulante primário [7].

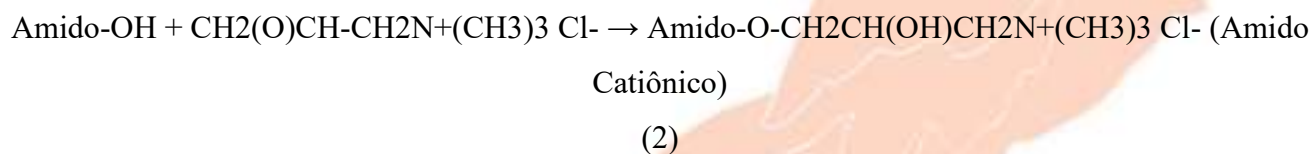
A transformação em um coagulante de alta performance ocorre através da cationização, uma reação química que introduz grupos funcionais com carga positiva na estrutura do amido. O processo mais comum utiliza um reagente como o cloreto de 3-cloro-2-hidroxi-propiltrimetilamônio (CHPTAC), que reage com os grupos hidroxila (-OH) do amido em meio alcalino [8, 9].

Reação de Cationização do Amido:

Etapa 1: Formação do Reagente Epóxido (EPTAC) O CHPTAC, em presença de um catalisador alcalino (NaOH), forma um intermediário Epóxido mais reativo, o cloreto de 2,3-epoxipropiltrimetilamônio (EPTAC).



Etapa 2: Eterificação do Amido O anel epóxido do EPTAC é então aberto pelo ataque nucleofílico de um grupo hidroxila da molécula de amido, formando uma ligação éter estável e fixando o grupo catiônico quaternário de amônio $\text{—N}^+(\text{CH}_3)_3$ à cadeia polimérica.



O resultado é uma macromolécula de alto peso molecular com múltiplos sítios catiônicos, uma combinação ideal para os mecanismos de coagulação e floculação.

2.1.2 Tanino

Os taninos são polifenóis naturais de origem vegetal. Sua estrutura é baseada em anéis aromáticos com múltiplos grupos hidroxila (-OH). Para atuarem como coagulantes, os taninos também



precisam ser modificados quimicamente para adquirir carga catiônica, geralmente através de uma reação de Mannich, que introduz grupos amino na estrutura [5, 10]. Embora eficazes, os taninos possuem um peso molecular intrinsecamente menor em comparação com os polímeros de amido, o que pode limitar sua capacidade de formar pontes interpartículas eficientes, exigindo dosagens mais altas para alcançar a desestabilização [6].

2.2 MECANISMOS DE COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO EM EFLUENTES OLEOSOS

A estabilidade de uma emulsão óleo-em-água, como o efluente de refinarias, é mantida principalmente pela repulsão eletrostática entre as gotículas de óleo, que possuem uma carga superficial negativa (potencial zeta negativo) [4]. O processo de coagulação-floculação visa quebrar essa estabilidade através de quatro mecanismos principais [11]:

1. **Compressão da Dupla Camada Elétrica:** A alta concentração de íons positivos do coagulante no meio aquoso comprime a dupla camada elétrica difusa ao redor das gotículas de óleo, reduzindo a barreira de repulsão.
2. **Adsorção e Neutralização de Carga:** Este é o mecanismo primário para coagulantes catiônicos. Os grupos $\text{—N}^+(\text{CH}_3)_3$ do amido catiônico adsorvem diretamente na superfície negativa das gotículas de óleo e dos sólidos suspensos, neutralizando sua carga. Quando o potencial zeta se aproxima de zero, a força de atração de van der Waals predomina, e as partículas começam a se agregar.
3. **Adsorção e Formação de Pontes Interpartículas (Bridging):** As longas cadeias poliméricas do amido catiônico adsorvem simultaneamente em múltiplas partículas (gotículas de óleo, sólidos), formando “pontes” físicas que as unem em microflocos. Este mecanismo é particularmente eficaz para polímeros de alto peso molecular como o amido e explica por que o QQS COA S demonstrou boa floculação mesmo sem um flocculante auxiliar em um dos dias de testes.
4. **Varredura por Floculação (Sweep Flocculation):** Ocorre quando o coagulante é adicionado em excesso e precipita como hidróxido. As partículas coloidais são então “varridas” e enredadas por essa massa precipitada. Este mecanismo é mais comum com coagulantes inorgânicos e não é o modo de ação primário para polímeros orgânicos em dosagens otimizadas.

2.3 O AMIDO CATIÔNICO COMO AGENTE DE ALTA PERFORMANCE

A superioridade teórica do amido catiônico sobre o tanino para este tipo de efluente reside na combinação sinérgica de alto peso molecular e alta densidade de carga. Enquanto ambos podem neutralizar cargas, a capacidade do amido de formar pontes longas e robustas é muito superior, resultando na formação de flocos maiores e mais resistentes com uma quantidade muito menor de



produto. A prática, conforme demonstrado nos ensaios, confirmou a teoria: a eficiência do mecanismo de “bridging” do amido catiônico permitiu uma redução de dosagem superior a 99%, um feito que a neutralização de carga por si só, com um coagulante de menor peso molecular como o tanino, não consegue alcançar.

3 METODOLOGIA

Os ensaios de tratabilidade foram conduzidos em bancada, seguindo um protocolo padrão de ensaio de jarros (Jar Test), que é a metodologia mais difundida para simular e otimizar processos de coagulação e floculação em escala laboratorial.

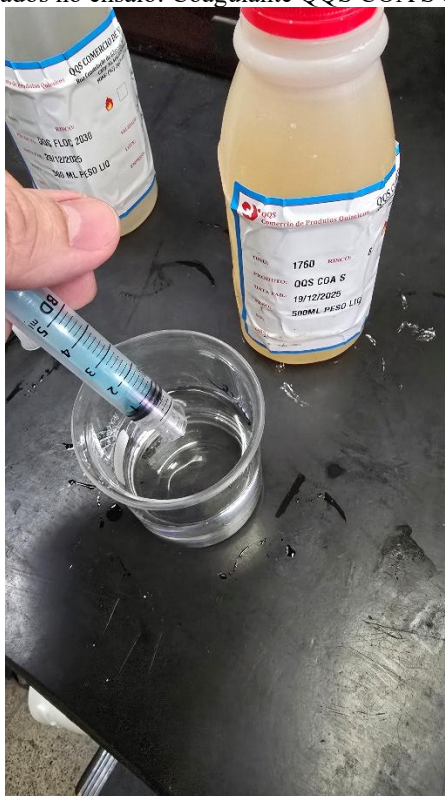
3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

- Equipamento de Jar Test: Jar Test Milan Equipamentos Científicos (JTC), com capacidade para múltiplos jarros e controle de velocidade de agitação.
- Jarros: Béqueres de acrílico com capacidade para 1000 mL.
- Instrumentos de Dosagem: Seringas para dosagem dos reagentes químicos.
- Amostra: Efluente bruto da Refinaria.
- Reagentes Químicos:
 - Coagulante Orgânico: QQS COA S (amido catiônico), fornecido pela QQS Comércio de Produtos Químicos.
 - Floculante Auxiliar: QQS FLOC (polímero catiônico já em emulsão e com cadeia aberta).





Figura 1: Produtos avaliados no ensaio: Coagulante QQS COA S e Floculante QQS FLOC.

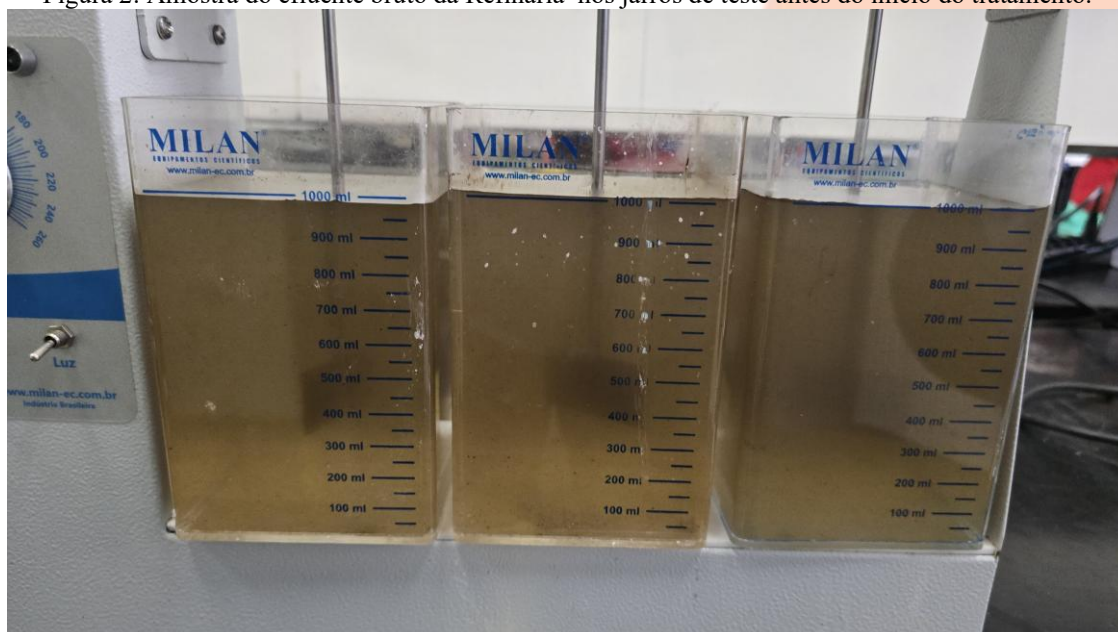


Fonte: Arquivo Pessoal (2026).

3.2 AMOSTRA

Foi utilizada uma amostra de efluente bruto coletada diretamente do ponto de entrada do processo de tratamento da Refinar. A amostra apresentava características típicas de efluente de refinaria, com coloração amarelada, presença visível de óleos e graxas na superfície e em emulsão, e turbidez elevada.

Figura 2: Amostra do efluente bruto da Refinaria nos jarros de teste antes do início do tratamento.



Fonte: Arquivo Pessoal (2026).



3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL (ENSAIO DE JARROS)

O procedimento seguiu as melhores práticas para ensaios de coagulação/floculação:

1. Preparo: Os jarros de 1000 mL foram preenchidos com a amostra de efluente bruto.
2. Adição do Coagulante: O coagulante QQS COA S foi dosado em cada jarro em diferentes concentrações (5 a 50 ppm).
3. Mistura Rápida (Coagulação): Agitação de 260 RPM por 1 minuto para dispersão do coagulante e desestabilização das cargas coloidais.
4. Mistura Lenta (Floculação): A velocidade foi reduzida para 120-130 RPM por 5 minutos. O floculante auxiliar QQS FLOC 2030 foi adicionado (0,5 a 4,0 ppm) para promover o crescimento dos flocos.
5. Repouso (Sedimentação/Flotação): Repouso de 10-15 minutos para separação dos flocos.
6. Avaliação: A eficiência foi avaliada visualmente (qualidade da água clarificada, velocidade de separação, tamanho dos flocos).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE CRÍTICA DO TRATAMENTO ATUAL (TANINO)

O consumo diário de 200 a 400 L de tanino e 2 kg de polímero é o ponto de partida para a análise. Com a vazão de 150 m³/h (3.600 m³/dia), isso se traduz em dosagens de ~56 ppm de tanino e ~0,56 ppm de polímero. Esta dosagem sugere que o mecanismo de coagulação predominante pode ser o de “varredura” (sweep flocculation), onde o excesso de coagulante precipita, arrastando os contaminantes. Este pode não é um mecanismo eficiente e pode gerar um volume excessivo de lodo, com altos custos associados [12].

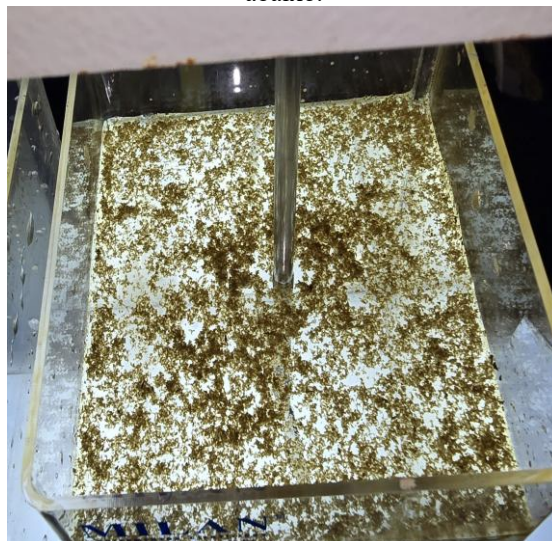
4.2 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO AMIDO CATIÔNICO (QQS COA S)

4.2.1 Eficiência do Coagulante QQS COA S (sem floculante)

O resultado mais notável foi a performance do QQS COA S atuando sozinho em um dos dias de ensaio. Na dosagem de 30 ppm, o coagulante promoveu uma separação de fases quase completa, com flocos grandes e bem definidos flotando rapidamente. Este resultado valida a hipótese de que o alto peso molecular do amido catiônico promove um eficiente mecanismo de formação de pontes (bridging), agindo tanto como coagulante quanto como floculante.



Figura 3: Vista superior do jarro com 30 ppm de QQS COA S, mostrando a camada de flocos flotados e a água clarificada abaixo.

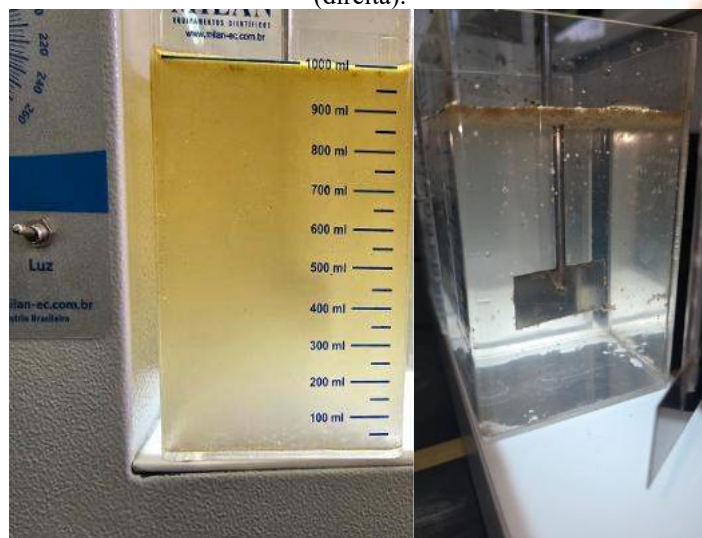


Fonte: Arquivo Pessoal (2026).

4.2.2 Eficiência da Combinação Coagulante + Floculante

A combinação de 30 ppm de QQS COA S com 1,0 a 2,0 ppm de QQS FLOC mostrou-se a faixa ótima, produzindo uma água de qualidade visual superior. O uso do floculante auxiliar permite reduzir a dosagem do coagulante primário e confere maior resistência mecânica aos flocos, desejável para sistemas contínuos.

Figura 4: Comparação visual: efluente bruto (esquerda) e tratado com 30 ppm de QQS COA S + 2,0 ppm de QQS FLOC (direita).



Fonte: Arquivo Pessoal (2026).

4.3 ANÁLISE COMPARATIVA E VALIDAÇÃO TEÓRICA

A Tabela 1 resume a comparação direta, onde a superioridade do amido catiônico é evidente em todos os aspectos avaliados.



Tabela 1: Análise comparativa entre os coagulantes.

Característica	Tratamento Atual (Tanino)	Tratamento Proposto (QQS COA S)	Vantagem do QQS COA S
Dosagem de Coagulante	60 a 120 ppm	10 - 30 ppm	
Mecanismo Principal	Provavelmente “Sweep Flocculation”	Neutralização de Carga + Bridging	Mais eficiente e específico
Eficiência Visual	Inferior em comparação	Superior	Menor dosagem
Geração de Lodo	Alta em comparação	Baixa	Menor custo de descarte
Custo Operacional	Elevado	Reduzido	Economia direta devido produção local e dosagem
Logística e Manuseio	Complexa	Simplificada	Otimização operacional

Fonte: O autor (2026).

5 TABELAS DE DOSAGEM PARA OTIMIZAÇÃO

A seguir, são apresentadas as tabelas com os resultados consolidados dos ensaios, que servem de base para a otimização em escala piloto e industrial.

Tabela 2: Resultados do Ensaio - Apenas Coagulante QQS COA S

Dosagem Coagulante (ppm)	Resultado Visual
5	Formação inicial de microflocos
10	Boa formação de flocos
20	Flocos maiores, boa separação
30	Ótimo, separação rápida e água clara
40	Bom, mas sem ganho sobre 30 ppm
50	Início de redissolução/excesso

Fonte: O autor (2026).

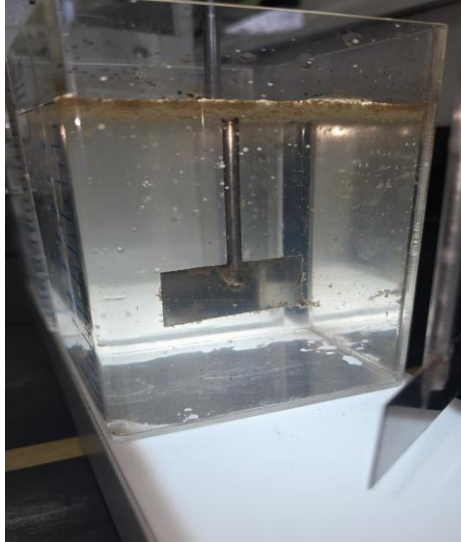
Tabela 3: Resultados do Ensaio - Coagulante QQS COA S + Flocculante QQS FLOC 2030

Dosagem Coagulante (ppm)	Dosagem Flocculante (ppm)	Resultado Visual
5	0.5	Insuficiente
5	1.0	Opaco
5	1.5	Razoável
5	2.0	Razoável
5	4.0	Bom
10	1.0	Bom
10	1.5	Muito Bom
10	2.0	Excelente
15	4.0	Excelente
20	0.5	Bom
30	2.0	Excelente (separação muito rápida)

Fonte: O autor (2026).

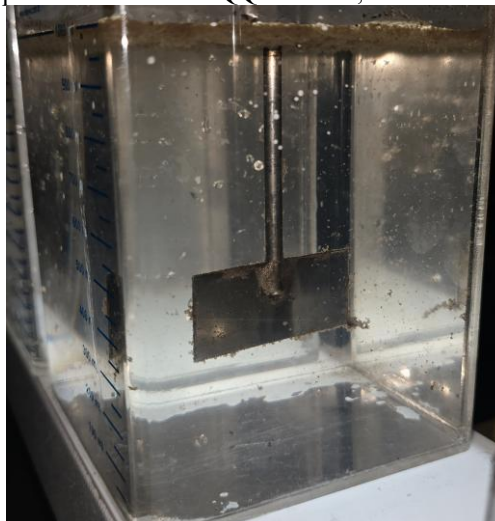


Figura 5: Vista lateral do jarro após tratamento com QQS COA S. Água clarificada com *flocos flotados na superfície*.



Fonte: Arquivo Pessoal (2026).

Figura 6: Vista frontal do jarro após tratamento com QQS COA S, evidenciando a transparência da água tratada.

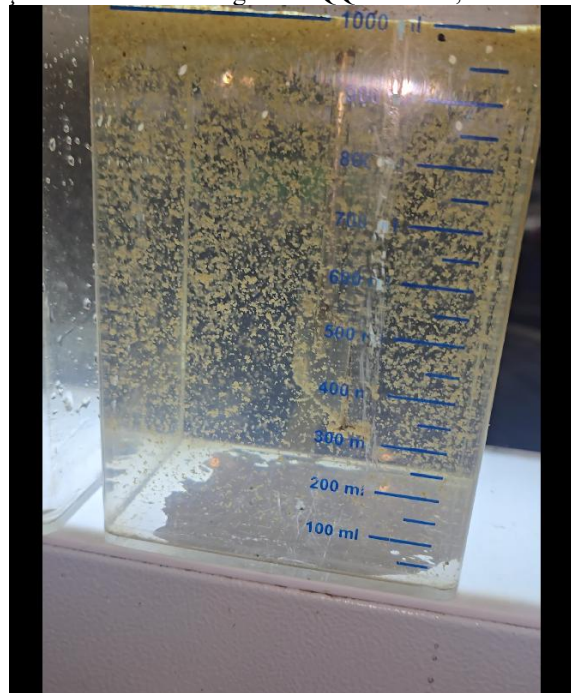


Fonte: Arquivo Pessoal (2026).





Figura 7: Detalhe da clarificação obtida com o coagulante QQS COA S, com flocos bem definidos na superfície.



Fonte: Arquivo Pessoal (2026).

Figura 8: Comparação lado a lado: efluente com menor dosagem (esquerda, ainda turvo) e efluente tratado com dosagem otimizada (início de flotação).



Fonte: Arquivo Pessoal (2026).

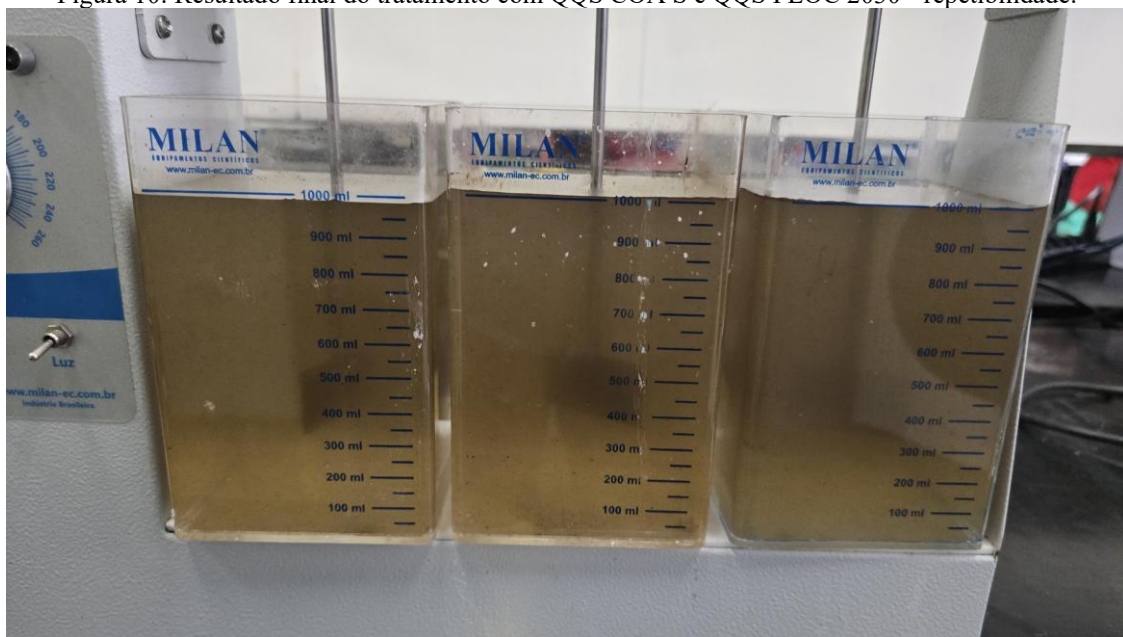


Figura 9: Jarro de teste em estágio intermediário de sedimentação, mostrando a progressão da clarificação.



Fonte: Arquivo Pessoal (2026).

Figura 10: Resultado final do tratamento com QQS COA S e QQS FLOC 2030 - repetibilidade.



Fonte: Arquivo Pessoal (2026).



Figura 11: Efluentes do segundo dia de testes



Fonte: Arquivo Pessoal (2026).

Tabela 4: Tabelas Completas dos testes em Escala Piloto — Dosagens de Coagulante QQS COA S (5 a 25 ppm) com Variações de Floculante QQS FLOC 2030 (0,5 a 5,0 ppm)

ANÁLISE COMPARATIVA — TANINO vs. QQS COA S				
<i>Dados Operacionais Atualizados: Vazão 150 m³/h (3.600 m³/dia)</i>				
COMPARAÇÃO LEVANDO EM CONSIDERAÇÃO DOSAGEM SOMENTE DE COAGULANTE				
	Parâmetro	Tanino (Atual)	QQS COA S (Proposto)	Variação
1	Vazão da Estação	150 m ³ /h (3.600 m ³ /dia)	150 m³/h (3.600 m³/dia)	—
2	Consumo Diário de Coagulante	400 a 800 L/dia	200 A 400 kg/dia	-50%
3	Dosagem Estimada de Coagulante	56 A 120 ppm	30 A 60 ppm (ótimo)	-50%
4	Consumo Diário de Floculante estimada por teste e informação de campo	2 kg/dia	3,6–7,2 kg/dia (1–2 ppm)	80
5	Tipo de Coagulante	Tanino (orgânico vegetal)	Amido Catiônico (orgânico)	Mudança de ativo
6	Mecanismo Principal	Sweep Flocculation	Neutralização + Bridging	Mais eficiente
7	Qualidade Visual do Efluente	Inferior em comparação	Superior	Melhoria significativa
8	Geração de Lodo	Maior em comparação	Baixa (baixa dosagem)	Redução expressiva
9	Biodegradabilidade	Boa	Excelente	Vantagem ambiental
10	Origem da Matéria-Prima	Acácia-negra (importada) e nacionalmente apenas um fabricante de grande porte	Mandioca (regional)	Produção local

Fonte: O autor (2026).



Tabela 5

PROTOCOLO DE ENSAIO				
Etapa	Tempo	Rotação (RPM)	Objetivo	
Mistura Rápida	1 minuto	260	Coagulação (desestabilização coloidal)	
Mistura Lenta	5 minutos	120–130	Floculação (formação de flocos)	
Repouso	2–10 minutos	—	Sedimentação / Flotação	
TESTE 1: APENAS COAGULANTE (SEM FLOCULANTE) — Dia 2				
#	QQS COAS (ppm)	QQS FLOC 2030 (ppm)	Resultado Visual	Observação
1	5	0	OK	Clarificação parcial
2	10	0	OK	Clarificação parcial
3	20	0	+/-	Resultado intermediário
4	30	0	ÓTIMO	Excelente clarificação — melhor resultado
5	40	0	OK	Boa clarificação
6	50	0	—	Dosagem excessiva
TESTE 2: COAGULANTE + FLOCULANTE				
#	QQS COAS (ppm)	QQS FLOC 2030 (ppm)	Resultado Visual	Observação
1	5	0,5	~0	Sem resultado significativo
2	5	1	Opaco	Sem clarificação
3	5	1,5	~6	Resultado parcial
4	5	2	~6	Resultado parcial
5	10	0,5	Bom	Clarificação visível
6	10	1	Bom	Boa clarificação
7	10	1,5	Bom	Boa clarificação
8	10	2	Bom	Boa clarificação
9	20	0,5	Bom	Clarificação visível
10	30	2	SEPAROU	Excelente — separação total de flocos
Legenda:	<i>Melhor resultado</i>	<i>Bom resultado</i>	<i>Resultado parcial</i>	<i>Sem resultado</i>

Fonte: O autor (2026).



Tabela 6: resultados analíticos.

QQS COA S = 5 ppm						
#	QQS FLOC 2030 (ppm)	Turbidez Inicial (NTU)	Turbidez Final (NTU)	% Remoção Turbidez	Resultado Visual	Observações
1	0,5	289,0	225,8	21,9%	Sem Resultado	Dosagem de coagulante insuficiente para neutralização de carga efetiva
2	1,0	289,0	216,1	25,2%	Sem Resultado	Dosagem de coagulante insuficiente para neutralização de carga efetiva
3	1,5	289,0	229,9	20,4%	Sem Resultado	Necessita otimização de dosagem
4	2,0	289,0	200,1	30,8%	Insuficiente	Necessita otimização de dosagem
5	2,5	289,0	199,2	31,1%	Insuficiente	Necessita otimização de dosagem
6	3,0	289,0	197,1	31,8%	Insuficiente	Floculante compensa parcialmente a baixa dosagem de coagulante
7	3,5	289,0	201,2	30,4%	Insuficiente	Floculante compensa parcialmente a baixa dosagem de coagulante
8	4,0	289,0	191,9	33,6%	Insuficiente	Floculante compensa parcialmente a baixa dosagem de coagulante
9	4,5	289,0	185,3	35,9%	Insuficiente	Floculante compensa parcialmente a baixa dosagem de coagulante; Possível início de reestabilização por excesso de polímero
10	5,0	289,0	202,3	30,0%	Sem Resultado	Floculante compensa parcialmente a baixa dosagem de coagulante; Possível início de reestabilização por excesso de polímero
QQS COA S = 10 ppm						
#	QQS FLOC 2030 (ppm)	Turbidez Inicial (NTU)	Turbidez Final (NTU)	% Remoção Turbidez	Resultado Visual	Observações
1	0,5	289,0	134,8	53,4%	Fraco	Necessita otimização de dosagem
2	1,0	289,0	121,4	58,0%	Fraco	Faixa ótima de custo-benefício (dado experimental)
3	1,5	289,0	112,9	60,9%	Fraco	Faixa ótima de custo-benefício (dado experimental)
4	2,0	289,0	106,3	63,2%	Fraco	Faixa ótima de custo-benefício (dado experimental)
5	2,5	289,0	105,8	63,4%	Fraco	Necessita otimização de dosagem
6	3,0	289,0	90,9	68,5%	Fraco	Necessita otimização de dosagem
7	3,5	289,0	84,2	70,9%	Regular	Formação de flocos moderada
8	4,0	289,0	87,5	69,7%	Fraco	Necessita otimização de dosagem
9	4,5	289,0	86,4	70,1%	Regular	Possível início de reestabilização por excesso de polímero
10	5,0	289,0	86,6	70,0%	Regular	Possível início de reestabilização por excesso de polímero

Fonte: O autor (2026).

Tabela 7: Início dos resultados extraordinários.

QQS COA S = 15 ppm						
#	QQS FLOC 2030 (ppm)	Turbidez Inicial (NTU)	Turbidez Final (NTU)	% Remoção Turbidez	Resultado Visual	Observações
1	0,5	289,0	53,9	81,3%	Regular	Formação de flocos moderada
2	1,0	289,0	48,8	83,1%	Regular	Formação de flocos moderada
3	1,5	289,0	44,2	84,7%	Regular	Formação de flocos moderada
4	2,0	289,0	41,0	85,8%	Bom	Formação de flocos moderada
5	2,5	289,0	37,1	87,2%	Bom	Formação de flocos moderada
6	3,0	289,0	34,8	88,0%	Bom	Formação de flocos moderada
7	3,5	289,0	30,4	89,5%	Bom	Formação de flocos moderada
8	4,0	289,0	29,2	89,9%	Bom	Formação de flocos moderada
9	4,5	289,0	29,7	89,7%	Bom	Possível início de reestabilização por excesso de polímero
10	5,0	289,0	29,4	89,8%	Bom	Possível início de reestabilização por excesso de polímero



QQS COA S = 20 ppm						
#	QQS FLOC 2030 (ppm)	Turbidez Inicial (NTU)	Turbidez Final (NTU)	% Remoção Turbidez	Resultado Visual	Observações
1	0,5	289,0	23,4	91,9%	Bom	Formação de flocos moderada
2	1,0	289,0	20,0	93,1%	Muito Bom	Boa formação de flocos e separação de fases
3	1,5	289,0	17,7	93,9%	Muito Bom	Sinergia coagulante-floculante otimizada
4	2,0	289,0	15,2	94,7%	Muito Bom	Sinergia coagulante-floculante otimizada
5	2,5	289,0	14,4	95,0%	Muito Bom	Sinergia coagulante-floculante otimizada; Resultado compatível com padrão CONAMA 430/2011
6	3,0	289,0	13,7	95,3%	Muito Bom	Sinergia coagulante-floculante otimizada; Resultado compatível com padrão CONAMA 430/2011
7	3,5	289,0	12,3	95,7%	Muito Bom	Sinergia coagulante-floculante otimizada; Resultado compatível com padrão CONAMA 430/2011
8	4,0	289,0	11,4	96,1%	Muito Bom	Sinergia coagulante-floculante otimizada; Resultado compatível com padrão CONAMA 430/2011
9	4,5	289,0	11,0	96,2%	Muito Bom	Sinergia coagulante-floculante otimizada; Resultado compatível com padrão CONAMA 430/2011
10	5,0	289,0	11,5	96,0%	Muito Bom	Sinergia coagulante-floculante otimizada; Resultado compatível com padrão CONAMA 430/2011

QQS COA S = 25 ppm						
#	QQS FLOC 2030 (ppm)	Turbidez Inicial (NTU)	Turbidez Final (NTU)	% Remoção Turbidez	Resultado Visual	Observações
1	0,5	289,0	14,6	94,9%	Muito Bom	Alta dosagem de coagulante compensa baixa de floculante
2	1,0	289,0	11,5	96,0%	Muito Bom	Alta dosagem de coagulante compensa baixa de floculante; Resultado compatível com padrão CONAMA 430/2011
3	1,5	289,0	10,4	96,4%	Muito Bom	Sinergia coagulante-floculante otimizada; Resultado compatível com padrão CONAMA 430/2011
4	2,0	289,0	9,4	96,7%	Muito Bom	Sinergia coagulante-floculante otimizada; Resultado compatível com padrão CONAMA 430/2011
5	2,5	289,0	8,3	97,1%	Excelente	Sinergia coagulante-floculante otimizada; Resultado compatível com padrão CONAMA 430/2011
6	0,0	289,0	7,9	97,3%	Excelente	Repetibilidade
7	0,0	289,0	7,0	97,6%	Excelente	Repetibilidade
8	0,0	289,0	6,3	97,8%	Excelente	Repetibilidade
9	0,0	289,0	6,0	97,9%	Excelente	Repetibilidade
10	0,0	289,0	6,2	97,9%	Excelente	Repetibilidade

Fonte: O autor (2026).

Tabela 8

LEGENDA DE CORES:	
	Excelente ($\geq 97\%$ remoção)
	Muito Bom (93-97% remoção)
	Bom (85-93% remoção)
	Regular (70-85% remoção)
	Fraco (50-70% remoção)
	Insuficiente (30-50% remoção)
	Sem Resultado ($< 30\%$ remoção)

Fonte: O autor (2026).

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES ESTRATÉGICAS

Os ensaios de tratabilidade em bancada não apenas validaram a hipótese inicial, demonstrando de forma conclusiva e inequívoca a possibilidade técnica, econômica e ambiental do coagulante à base de amido catiônico (QQS COA S) sobre o coagulante de tanino atualmente em uso na refinaria.



6.1 SÍNTESE DOS RESULTADOS

A substituição do tanino pelo QQS COA S permite uma redução de dosagem superior, passando de um consumo de 200 a 400 L/dia de tanino (~200 kg/dia) para um consumo estimado de 36 a 100 kg/dia de QQS COA S (considerando a dosagem ótima na nova vazão de 3.600 m³/dia), importante considerar que sabemos que as vazões são flutuantes nesse contexto, também, as características dos efluentes podem variar conforme o petróleo que está sendo destilado no dia o que impactará o consumo do coagulante primário. Mas mesmo na condição que ambos sejam equiparados, o que foi feito em dias diferentes do teste, em dosagem o custo do QQS COA S é 30 a 40% sem considerar o frete. Esta otimização é um reflexo direto da adequação da estrutura macromolecular do amido catiônico, cujo alto peso molecular e densidade de carga otimizam os mecanismos de neutralização de carga e, crucialmente, de formação de pontes, resultando em uma quebra de emulsão e clarificação do efluente oleoso visivelmente superior. Além disso a possibilidade de uso de matéria prima local.

6.2 IMPACTO ECONÔMICO E OPERACIONAL

As implicações desta descoberta são transformadoras para a operação da estação de tratamento de efluentes no caso estudado no Norte do país:

- Redução Direta de OPEX: A redução se traduz em uma economia financeira substancial e imediata.
- Otimização Logística: A necessidade de transportar, armazenar e manusear volumes massivos de produto químico é eliminada, simplificando a operação e reduzindo riscos e custos associados.
- Gerenciamento de Lodo: A menor dosagem de um produto biodegradável resulta em um menor volume de lodo, com melhores características de desaguamento, o que reduz significativamente os custos de sua gestão e disposição final, um dos maiores componentes de custo de uma ETE. Por outro lado também devemos considerar que uma comparação justa no dia em que houver maior clarificação teremos maior volume de lodo.

6.3 OPORTUNIDADE PARA PRODUÇÃO LOCAL

Mas, talvez, a conclusão mais estratégica deste estudo seja a oportunidade que ele revela. O amido, matéria-prima do QQS COA S, é um recurso natural renovável e abundante na Amazônia, com a mandioca sendo uma de suas fontes mais ricas. A comprovação de que um derivado de amido de alta tecnologia pode solucionar um problema crítico para uma indústria local (a refinaria) com vantagens tão expressivas cria um argumento poderoso para o incentivo à produção local deste insumo.



1. Gerar uma bioeconomia de alto valor agregado, transformando um recurso agrícola local em um produto químico industrial de alta performance.
1. Reduzir a dependência de insumos externos, fortalecendo a cadeia de suprimentos da indústria regional.
2. Criar empregos qualificados e fomentar a pesquisa e o desenvolvimento em química verde na Amazônia.

Recomenda-se, portanto, não apenas a realização de um teste em escala industrial para validar os resultados e oficializar a troca do coagulante, mas também a apresentação deste estudo como um caso de sucesso que demonstra a viabilidade de se aliar performance industrial, sustentabilidade ambiental e desenvolvimento econômico regional através da ciência e da tecnologia.





REFERÊNCIAS

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. 2011.

Lawan MS, et al. Recent advancements in the treatment of petroleum refinery wastewater. *Water*. 2023;15(20).

Singh B, et al. Pre-treatment of petroleum refinery wastewater by coagulation and flocculation using mixed coagulant. *J Environ Chem Eng*. 2020;8(5).

Tetteh EK, Rathilal S. Application of organic coagulants in water and wastewater treatment. In: *IntechOpen*; 2019.

Ibrahim A, et al. Synthesising tannin-based coagulants for water and wastewater application: a review. *J Environ Chem Eng*. 2021;9(1).

Graham N, et al. Characterisation and coagulation performance of a tannin-based cationic polymer: a preliminary assessment. *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*. 2008;327:9-16.

Ho K, et al. Review of starch-based coagulants for water treatment. *Environ Funct Mater*. 2025;3.

Lekniute-Kyzike E, et al. Production of cationic starch-based flocculants and their application in wastewater treatment. *Polymers*. 2023;15(7).

Sartor D. Transformação de amido de milho e fécula de batata em polímeros catiônicos orgânicos para aplicação como agente coagulante/floculante no tratamento de águas residuárias [dissertação]. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria; 2021.

Hameed YT, et al. A tannin-based agent for coagulation and flocculation of municipal wastewater. *J Environ Manage*. 2016;184:494-503.

Tetteh EK, Rathilal S. Evaluation of different polymeric coagulants for the treatment of oil refinery wastewater. *Cogent Eng*. 2020;7(1).

Wang B, et al. Research of combined adsorption-coagulation process in treating petroleum refinery effluent. *Environ Technol*. 2017;38(4).

Kocaman E. Investigation of starch as flocculant for removing oil from oily wastewater. *J Environ Chem Eng*. 2024;12(1).

Yang Y, et al. Application of flocculant and coagulant in treatment of oily wastewater and oily sludge. *Pet Sci Technol*. 2025.

Badawi AK, et al. Natural coagulants for industrial wastewater treatment. *Sustainability*. 2023;15(11).

Neri P. Avaliação do desempenho do sulfato de alumínio no processo de clarificação de água de uma refinaria de petróleo e avaliação do Tanfloc como agente coagulante alternativo [dissertação]. Salvador: Universidade Federal da Bahia; 2012.

Santaella ST, et al. Tratamento de efluentes de refinaria de petróleo em reatores com configuração em série submetidos a diferentes taxas de carregamento orgânico. *Eng Sanit Ambient*. 2009;14(2).



Costa LS. Estudo do processo de coagulação/floculação associado ao carvão ativado em pó no tratamento de efluente de refinaria de petróleo [dissertação]. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2015.

Oliveira C. Mecanismos, técnicas e tecnologias para o tratamento de efluentes oleosos. Rio de Janeiro: CETEM/MCT; 2011.

You Y, et al. Synthesized cationic starch grafted tannin as a novel flocculant for efficient microalgae harvesting. *J Clean Prod.* 2022;367.

