



República Federativa do Brasil

Ministério do Desenvolvimento, Indústria,
Comércio e Serviços

Instituto Nacional da Propriedade Industrial



(21) BR 102021025779-2 A2

(22) Data do Depósito: 20/12/2021

(43) Data da Publicação Nacional:
27/06/2023

(54) Título: PROCESSO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES E/OU ÁGUAS RESIDUÁRIAS POR CAVITAÇÃO HIDRODINÂMICA ASSOCIADA À COAGULAÇÃO, FLOCULAÇÃO, OZONIZAÇÃO E ADSORÇÃO COM CARVÃO ATIVADO EM PÓ

(51) Int. Cl.: C02F 1/52; C02F 1/78; C02F 9/00.

(52) CPC: C02F 1/52; C02F 1/78; C02F 9/00.

(71) Depositante(es): UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - UNICAMP; UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JULIO DE MESQUITA FILHO - UNESP; UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG.

(72) Inventor(es): JANAINA DE MELO FRANCO DOMINGOS; JOSÉ ROBERTO GUIMARÃES; ANDRÉ HENRIQUE ROSA; THIAGO DE ALENCAR NEVES; DJALMA LUCAS DE SOUSA MAIA; OSWALDO LUIZ ALVES.

(57) Resumo: PROCESSO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES E/OU ÁGUAS RESIDUÁRIAS POR CAVITAÇÃO HIDRODINÂMICA ASSOCIADA À COAGULAÇÃO, FLOCULAÇÃO, OZONIZAÇÃO E ADSORÇÃO COM CARVÃO ATIVADO EM PÓ. A presente invenção se refere a um processo para o tratamento de efluentes e águas residuárias compreendendo etapas de coagulação/floculação, ozonização, cavitação hidrodinâmica e adsorção com carvão ativado em pó. A presente invenção possui aplicação nas indústrias de tratamento de efluentes domésticos e industriais, tratamento de esgoto e tratamento de água, para saneamento básico e gestão de resíduos sólidos.

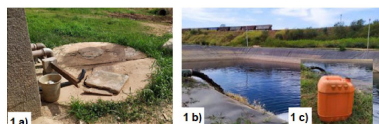


FIGURA 1

**PROCESSO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES E/OU ÁGUAS RESIDUÁRIAS
POR CAVITAÇÃO HIDRODINÂMICA ASSOCIADA À COAGULAÇÃO,
FLOCULAÇÃO, OZONIZAÇÃO E ADSORÇÃO COM CARVÃO ATIVADO EM PÓ**

Campo da Invenção

[001] A presente invenção se insere no campo tecnológico da química sanitária e ambiental, mais especificamente nos processos de tratamento de matrizes ambientais, como efluentes e águas residuárias.

[002] A presente invenção se caracteriza por ser um processo para o tratamento de efluentes e águas residuárias compreendendo etapas de coagulação/floculação aplicadas anteriormente à ozonização, cavitação hidrodinâmica e posteriormente aplicado polimento com carvão ativado em pó.

Fundamentos da Invenção

[003] Um dos maiores desafios da sociedade moderna é o equacionamento da geração excessiva e da disposição final ambientalmente segura dos resíduos sólidos. A preocupação mundial em relação aos resíduos sólidos, em especial os domiciliares, tem aumentado ante o crescimento da produção, do gerenciamento inadequado e da falta de áreas para a disposição final.

[004] A disposição de resíduos sólidos pode ser executada usualmente de três formas: lixão, aterro controlado e aterro sanitário. Entretanto, as formas de disposição realizadas inadequadamente representam um grave passivo ambiental para os municípios, configurando-se como um problema ambiental e de saúde pública, contrariando assim o Art.225 da Legislação Brasileira (FEAM,2010).

[005] Segundo Gouveia (1999), a situação vivida pelos municípios densamente urbanizados é a falta de locais

apropriados para a disposição de seus resíduos sólidos. Isso se deve à existência de áreas ambientalmente protegidas e aos impactos na vizinhança das áreas de disposição. O autor ainda afirma que na maioria dos aterros sanitários não há tratamento adequado para o lixiviado gerado, o que pode favorecer a contaminação das águas subterrâneas (GOUVEIA, N. Saúde e meio ambiente nas cidades: os desafios da saúde ambiental. Saúde e Sociedade, v.8, n.1, p.49-61, 1999).

[006] O aterro sanitário é um processo de disposição de resíduos sólidos urbanos (RSU) no solo, sem danos à saúde pública, fundamentado em critérios de engenharia e normas específicas, utilizando-se de instrumentos de medidas de minimização de impactos ambientais como a Avaliação de Impacto Ambiental (AIA), redução de áreas a fim de confinar os RSU ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho e em intervalos menores se necessário.

[007] Entretanto, sabe-se que no processo de degradação dos compostos orgânicos nos aterros sanitários gera-se um líquido escuro com grande potencial poluidor, comumente chamado chorume ou lixiviado, que possui concentração de matéria orgânica elevada, recalcitrância ao processo biológico de tratamento, nitrogênio amoniacal, sais e toxicidade a organismos aquáticos.

[008] Mais especificamente, o lixiviado do aterro sanitário é gerado como resultado da percolação da precipitação pluviométrica juntamente aos resíduos (compostos orgânicos e inorgânicos) depositados e formados durante processos de estabilização da matéria orgânica. Esse efluente, quando descartado sem tratamento prévio, causa

grandes problemas ambientais como: toxicidade para a biota existente no solo e comunidades aquáticas atingidas; diminuição do oxigênio dissolvido e eutrofização nos corpos d'água receptores.

[009] A caracterização dos elementos constituintes do lixiviado pode variar devido à influência da variedade de resíduos sólidos dispostos no interior do aterro. Com isso, a determinação das características do lixiviados dos aterros brasileiros, que recebem resíduos de origem doméstica, com idades inferiores a cinco anos ("aterros jovens") podem gerar lixiviados com concentrações elevadas de matéria orgânica refratária, amônia e compostos tóxicos orgânicos e inorgânicos, além de baixo pH e valores de cor.

[0010] Normalmente, o pH dos lixiviados está entre 5,8 a 8,5, devido à atividade biológica no interior das células. Além disso, a relação DBO_5/DQO , em que DQO se refere à Demanda Química de Oxigênio e DBO_5 se refere à Demanda bioquímica de Oxigênio (é menor que 0,1 com o envelhecimento dos aterros, o que é devido ao lançamento de grandes moléculas orgânicas recalcitrantes dos resíduos sólidos. Conseqüentemente, o lixiviado em aterros antigos é caracterizado por sua baixa relação DBO_5/DQO e nitrogênio amoniacal (NH_3-N) razoavelmente alto. Além disso, o lixiviado pode conter alguns compostos tóxicos, como hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA), bifenilas policlorados (PCB) e metais pesados.

[0011] Uma vez que os aterros sanitários recebem uma mistura de resíduos domésticos e comerciais, os lixiviados podem ser caracterizados como uma solução aquosa com quatro grupos de poluentes: material orgânico dissolvido (ácidos

graxos voláteis e compostos orgânicos mais refratários como ácidos húmicos e fúlvicos), macro componentes inorgânicos tais como: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , metais pesados tais como: Cd^{2+} , Cr^{3+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} e compostos orgânicos xenobióticos originários de resíduos domésticos e químicos presentes em baixas concentrações (hidrocarbonetos aromáticos, fenóis, pesticidas, entre outros).

[0012] Além disso, os íons geralmente encontrados em lixiviados de aterros são combinados por espécies doadoras de elétrons e podem se ligar a cadeias curtas de carbono, tornando-os solúveis e com potencial de atravessar tecidos animais e membranas biológicas.

[0013] Por isso, há necessidade de implantação de estações compactas como sistemas combinados em um único local, sem a utilização de grandes áreas para armazenamento/tratamento, com a finalidade de tratar este lixiviado de uma forma que possa ser lançado na rede de esgoto de forma integral, sem que seja diluído e possa receber o tratamento final adequado dentro dos padrões da legislação.

[0014] A coagulação de substâncias dissolvidas e coloidais nas águas e diversos tipos de efluentes são entendidos, segundo a teoria DLVO (*Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek*), de forma simplificada, que os coloides (liofóbicos e magnéticos) aquosos são partículas insolúveis e dispersas no meio, não apresentando afinidade ao solvente. A partir de um condicionamento dado à superfície, estas se tornam estáveis considerando as interações interpartículas, como forças atrativas (*Van der Waals*), quanto repulsivas

(eletrostáticas) e de interação magnética (coloides magnéticos).

[0015] A coagulação/floculação (C/F) é uma das técnicas aplicadas a fim de obter uma separação sólido-líquido mais eficiente, principalmente em pré-tratamentos de água. Além disso, pode ser utilizada com sucesso no tratamento de lixiviados de aterros sanitários estabilizados e/ou antigos.

[0016] O processo de coagulação-floculação é aplicado em diversas estações de tratamento de efluentes. Os coagulantes mais utilizados para polimento ou ainda para remover a matéria orgânica não biodegradável são: sulfato de alumínio, cloreto férrico e sulfato férrico, que são facilmente solúveis em água. No entanto, o cloreto de polialumínio (PAC), cloreto férrico de polialumínio (ClFPA), sulfato de poliésteres (SP) e cloreto poliférrico (ClPF) podem proporcionar melhor remoção de cor mesmo em baixa temperatura e produzem menor volume de lodo.

[0017] Contudo, as desvantagens deste tratamento ao ser realizado unificado é que pode haver um aumento considerável de lodo após a utilização das concentrações de alumínio ou ferro na fase líquida.

[0018] O cloreto de alumínio (AlCl_3) é um sólido cristalino, proveniente da reação do cloro com alumínio fundido. É uma substância higroscópica e sua estrutura é geralmente encontrada na forma hexahidratada $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Segundo Pavanelli (2001), o cloreto férrico (FeCl_3) é proveniente da reação a quente do ácido clorídrico concentrado com a hematita (minério de ferro), seguido do resfriamento e filtração. No tratamento de água, o cloreto

férrico reduz os níveis de turbidez e DBO, além de eliminar fosfatos e boa parte de metais pesados (mercúrio e chumbo) e demais como arsênio, selênio e bário (PAVANELLI, G. *Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada. Dissertação. Mestrado em Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 233p. 2001.*). Sendo assim, tanto o cloreto de alumínio (AlCl_3) quanto o cloreto férrico (FeCl_3) são coagulantes utilizados em muitas aplicações industriais, bem como no tratamento de água e esgotos.

[0019] Além disso, segundo Sung *et al.* (2005), os estudos com biopolímeros têm atraído atenção da indústria de biomateriais e também de cientistas, tendo em vista a busca pela sustentabilidade na produção de materiais de fácil degradação pela natureza e redução na utilização de produtos químicos muitas vezes tóxicos à saúde humana (SUNG, M.-H., PARK, C., KIM, C.-J., POO, H., SODA, K., & ASHIUCHI, M. (2005). *Natural and edible biopolymer poly- γ -glutamic acid: synthesis, production, and applications. The Chemical Record*, 5(6), 352-366. doi:10.1002/tcr.20061).

[0020] O $\text{PG}\alpha 21\text{Ca}$ é o nome comercial do ácido poli- γ -glutâmico (PGA), que contém em sua estrutura: 14% de ácido poli- γ -glutâmico, estabilizado com minerais, como sulfato de cálcio. Obtido a partir de processos fermentativos de bactérias *Bacillus*, o ácido gama-poliglutâmico (γ -PGA) é caracterizado como biopolímero aniônico biodisponível em água, biodegradável, biocompatível e não tóxico.

[0021] O ácido poli-g-glutâmico ($\text{PG}\alpha 21\text{Ca}$) é um coagulante de poliamida e tem sido utilizado junto ao

tratamento de água devido ao alto rendimento em flocular uma ampla gama de compostos orgânicos e inorgânicos.

[0022] Os Processos Oxidativos Avançados (POA) são aqueles que utilizam o radical hidroxil ($\cdot\text{OH}$) para oxidar poluentes em espécies químicas. Este radical apresenta baixa seletividade, possibilitando a transformação de uma gama de contaminantes tóxicos em tempos mínimos. Um exemplo desse processo é a ozonização, que tem atraído grande interesse por apresentar uma série de vantagens como o alto potencial de oxidação, mesmo a baixas concentrações, via ozônio molecular ou radicais $\cdot\text{OH}$, ou uma combinação dos dois em pH básico, aumentando assim sua eficiência na decomposição da matéria orgânica.

[0023] Para Silva (2009), alguns processos oxidativos têm a grande vantagem de não gerarem subprodutos sólidos (lodo) e não haver a transferência de fase do poluente (como adsorção em carvão ativo, por exemplo). Os produtos finais são o gás carbônico (CO_2) e água (H_2O), quando ocorre a total mineralização dos compostos orgânicos (SILVA, F. B. *Tratamento Combinado de Lixiviados de Aterros Sanitários. 2009. Dissertação de mestrado em Tecnologia de processos químicos e bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química. Rio de Janeiro-RJ. 2009.*). O autor relata ainda que a principal desvantagem dos processos oxidativos é o elevado custo em relação aos demais processos de tratamento de lixiviados de aterros antigos, uma vez que apresentam baixa biodegradabilidade e alta concentração de compostos recalcitrantes.

[0024] Silva (2009) ainda destaca o potencial da utilização deste tipo de tratamento aplicado a tratamento de

efluentes em geral, mencionando que as principais vantagens dos POA's são: mineralização do poluente e não apenas transformá-lo de fase, indicados para compostos recalcitrantes, geralmente melhoram as características organolépticas da água tratada e são muito promissores, sob o ponto de vista econômico, se combinado com os tratamentos biológicos. Além disso, apresentam como desvantagens: alto custo no tratamento, interferência dos oxidantes residuais nas análises, necessidade de um controle rigoroso caso utilize esse método como pré-tratamento de sistemas biológicos, e deposição de sais em aparelhos usados nos processos que utilizam radiação comum, resultando na diminuição do poder de radiação. Como consequência, etapas dispendiosas de limpeza são necessárias.

[0025] Os POA's podem ser divididos em duas categorias gerais: homogêneos e heterogêneos. Em ambos, os radicais podem ser gerados com ou sem radiação ultravioleta (UV). O POA homogêneo compõe quase sempre uma reação fotolítica, enquanto o POA heterogêneo engloba os tratamentos mais utilizados e estudados pela comunidade científica: combinados a irradiação UV e uso de catalisador de dióxido de titânio (TiO_2).

[0026] Os processos oxidativos avançados promovem a degradação efetiva de poluentes orgânicos, dificilmente biodegradáveis, além da redução significativa de DQO em lixiviados.

[0027] Sabe-se que em pH alcalino, determinadas combinações com oxidantes podem gerar radicais hidroxilas com potencial oxidante alto ($E^\circ = 2,80$), de natureza não seletiva, podendo oxidar compostos rapidamente. Além disso,

as técnicas combinadas à ozonização promovem a conversão de complexos compostos moleculares em compostos mais simples e facilmente biodegradáveis.

[0028] A cavitação foi primeiramente analisada e descrita por Reynolds em 1840. Apesar de ser amplamente estudada como um fenômeno danoso para bombas hidráulicas, por outro lado, pode ser inserida no rol das técnicas físicas para tratamentos de águas e efluentes, se apresentando como alternativa promissora.

[0029] Cavitação hidrodinâmica (CH) é a formação, crescimento e colapso de cavidades de vapor induzida por um dispositivo de fluxo restritivo tal como uma bomba, bocal de jato, uma hélice ou placa de orifício. Com o colapso das cavidades, uma determinada bolha pode chegar a temperaturas e pressões elevadas (os chamados "pontos quentes"). A drástica mudança no ambiente provoca micro jatos de alta velocidade e geração de radicais livres devido à decomposição de vapor de água, resultando na decomposição dos poluentes.

[0030] Existem três fatores que colocam a CH em posição extremamente favorável ao tratamento de água e efluentes: a desintegração celular (estresse mecânico), temperaturas e pressões elevadas e a formação de átomos reativos (reação de oxidação).

[0031] A desintegração celular consiste na ruptura das células dos microrganismos e depende do efeito da cavitação no líquido, ocorrendo devido ao estresse mecânico das ondas de choque do colapso das cavidades. Este ambiente gera a desintegração dos microrganismos que ocupam o entorno da cavidade. A alta temperatura na periferia das implosões provoca a destruição de microrganismos e o colapso violento

das cavidades resulta na geração de temperaturas e de pressões superiores localmente. Entretanto, isso ocorre em milhões de posições no ambiente interno do líquido. O mesmo colapso provoca a formação de átomos reativos de hidrogênio e radicais hidroxilas que se recombinaem em solução para formar peróxido de hidrogênio que promove reações de oxidação no sistema. Logo, a cavitação hidrodinâmica ocorre quando um líquido se submete a uma redução dinâmica da pressão devido à restrição de dispositivos tais como: Venturi, placas de orifício, etc., ao operar-se sob temperatura constante.

[0032] Tullis (1989) exemplificou que o fenômeno para gerar cavitação pode ocorrer por meio de formação de um jato de água submerso de alta velocidade. A velocidade na tubulação de aproximação do orifício é relativamente baixa e a pressão relativamente alta (TULLIS, J. P. 1989. *Hydraulics of Pipelines: Pumps, Valves, Cavitation, Transients*. John Wiley & Sons, Inc.1989). Ao aproximar-se ao orifício a velocidade aumenta e a pressão diminui. Quando o jato deixa o orifício, uma intensa camada de cisalhamento é criada ao longo da região de separação do jato e a vizinhança, resultando em redemoinhos altamente destrutivos. Para Lohrberg e Stoffel (2001), o jato pode se deslocar com velocidade acima de 100 m.s^{-1} , capaz de deformar um material sólido (LOHRBERG, H.; VOSS, B.; STOFFEL, B.; GLESNER, M. *Impeller Integrated Measurement of Cavitation Erosive Aggressiveness. 1ST IFAC CONFERENCE ON MECHATRONIC SYSTEMS, Darmstadt. 2001*).

[0033] Um dos maiores destaques para este tratamento relativamente novo é que o mesmo se trata de um método não-químico, ou seja, não gera quaisquer compostos tóxicos, o

que ocorre para os demais tratamentos, permitindo a possível utilização em larga escala.

[0034] A cavitação hidrodinâmica pode ser utilizada em combinação com ozônio para potencializar a eficiência do processo de tratamento do lixiviado. Devido à sua capacidade de criar pontos quentes na combinação, o ozônio pode ser facilmente difundido no poluente, reagindo de forma instantânea pela pressão dos orifícios.

[0035] O processo combinado de cavitação com ozônio produz dois radicais $\cdot\text{OH}$ para cada molécula de O_3 e, portanto, pode melhorar significativamente a eficiência de degradação do processo. No entanto, o carregamento de ozônio depende do tipo e concentração da molécula poluente a ser tratada.

[0036] Os reatores utilizados para a cavitação hidrodinâmica são representados por um circuito fechado, onde uma bomba retira a mistura reacional (lixiviado) do reservatório (reator), succionando-o e recalando para o mesmo reservatório, garantindo o regime permanente. A placa de orifício/Venturi é utilizada para provocar a cavitação, reduzindo a pressão para um valor abaixo da pressão de vapor. Sabe-se, entretanto, que na saída da bomba a pressão será superior, dificultando a redução da mesma, que só será alcançada usando orifícios pequenos.

[0037] Segundo Calgon Carbon (2019), o carvão ativado (CA) foi criado em 1940 a partir do carvão betuminoso, caracterizado como um material poroso que promove a remoção de compostos orgânicos de líquidos e gases por meio de um processo denominado "adsorção" (CALGON CARBON. 2019. *Activated Carbon. Disponível em:*

<<https://www.calgoncarbon.com/activated-carbon/>> Acesso em 19/12/2019.). Na adsorção, moléculas orgânicas contidas em um líquido ou gás são atraídas e ligadas à superfície dos poros do carvão ativado conforme o líquido ou gás entra em contato. Também possui as maiores forças de adsorção física, ou o maior volume de porosidade adsorvente.

[0038] O carvão ativado tem sido utilizado principalmente como adsorvente em Estações de Tratamento de Água e também para a recuperação de águas residuais industriais a fim de se obter qualidade potável.

[0039] A utilização do carvão ativado é recente, principalmente para tratamento como adsorvente em efluentes industriais, e tem sido utilizado com sucesso na recuperação de metais provenientes de efluentes de indústrias de galvanoplastia.

[0040] O cartão ativado é um material muito versátil não apenas como adsorventes, mas também pode ser utilizado como suportes de catalisadores para a remoção de poluentes em fases gasosas ou líquidas e a purificação ou recuperação de produtos químicos.

[0041] Diante do exposto, e de forma a solucionar o problema técnico associado à necessidade de uma maior eficiência no processo de tratamento dos efluentes ou águas residuárias, a presente invenção se apresenta como um processo compreendendo etapas de coagulação/floculação (C/F), ozonização/cavitação hidrodinâmica (O₃/CH) e carvão ativado (CA) para tratamento de efluentes e águas residuárias. O referido processo é capaz de alcançar elevado rendimento no tratamento destes efluentes em comparação com técnicas descritas no estado da técnica.

Estado da Técnica

[0042] O artigo científico de Webler *et al.* (2018) revela uma combinação de técnicas para o tratamento de lixiviado, sendo elas: coagulação/floculação (C/F), arraste com ar (*air stripping*) e ozonização, combinados com o tratamento por lodo ativado com/sem inserção de carvão ativado (WEBLER, A.D.; MAHLER, C. F.; DEZOTTI, M. Tratamento de lixiviado por processos combinados: coagulação/floculação, *air stripping*, ozonização e lodo ativado. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 23, p. 901-911, 2018.). Cabe ressaltar que os métodos de tratamento empregados são distintos dos da invenção proposta, como o *air stripping* e o lodo ativado. A presente invenção utilizou a combinação da ozonização associada à cavitação hidrodinâmica, não relatada pelo referido documento. Nesse sentido, para o procedimento proposto por Webler *et al.* (2018) foi necessário a utilização de grande quantidade de ozônio, o que pode aumentar de sobremaneira os custos do processo, isto é, foram utilizados 3516 mg.L⁻¹ de O₃ para conseguir uma remoção de cor de 98,4% e DQO de 75,3%. Já a invenção proposta utilizou 366 mg L⁻¹ e atingiu níveis de remoção de cor de 90,0% e DQO de 81,7%.

[0043] Além disso, o tratamento proposto pelos autores utilizou apenas um coagulante, o cloreto férrico, enquanto a presente invenção utilizou 2 coagulantes. Finalmente, ainda se salienta que a aplicação da técnica de lodos ativados implica na utilização de mão de obra especializada, maior área para instalação e maior tempo de tratamento quando comparado com o processo da presente invenção.

[0044] O documento intitulado "*Removal efficiencies of endocrine disrupting chemicals by coagulation/flocculation, ozonation, powdered/granular activated carbon adsorption, and chlorination*" revelou as eficiências de remoção de desreguladores endócrinos (EDCs), bisfenol A e nonilfenol, durante vários tipos de processos de tratamento de água usando experimentos em laboratório e em escala piloto. Os processos específicos de interesse foram coagulação/floculação, sedimentação/filtração (processo convencional de tratamento de água), carvão ativado em pó (CAP), carvão ativado granular (CAG), ozonização e cloração (CHOI, K. J. et al. *Removal efficiencies of endocrine disrupting chemicals by coagulation/flocculation, ozonation, powdered/granular activated carbon adsorption, and chlorination. Korean Journal of Chemical Engineering*, v. 23, n. 3, p. 399-408, 2006).

[0045] O documento foca no processo de tratamento de apenas dois poluentes (Bisfenol A e Nonilfenol), dentre um universo de substâncias químicas que são consideradas contaminantes emergentes. Além disso, o documento não realizou uma avaliação de parâmetros exigidos para tratamento de efluentes contidos em legislações vigentes (Federal e Estadual) tais como cor, DQO, turbidez, entre outros (vide Conama 430 e 357). O documento está focado em água de superfície e não efetuou todas as análises para o tratamento de água que são estabelecidas pelos órgãos ambientais, ou seja, o trabalho somente focou em dois poluentes e não em um processo de tratamento de água em geral.

[0046] Por outro lado, a invenção ora proposta realizou um estudo mais amplo e que possibilita o lançamento do efluente tratado diretamente na linha de esgotamento sanitário. Essa possibilidade resolve o problema de diversos aterros sanitários no país, por exemplo, que precisam deslocar seus lixiviados brutos até estações de tratamento de esgoto. Portanto, a presente invenção possibilita atingir os preceitos do marco regulatório do saneamento, gestão ambiental e de resíduos e o monitoramento e tratamento de efluentes e águas residuárias no contexto do saneamento urbano.

[0047] Além disso, no referido documento utilizou-se a combinação coagulação/floculação-sedimentação-oxidação-cloração-ozonização-adsorção. No entanto, a presente invenção proposta utilizou coagulação/floculação-ozonização associada à cavitação hidrodinâmica-adsorção com carvão ativado.

[0048] No documento foram ainda realizados testes de bancada com volume de 2 Litros, inferior ao volume tratado na invenção proposta, que trata 5 litros. Por fim, ainda se destaca que a presente invenção avaliou a redução de DQO, cor e turbidez e obteve percentuais de remoção de matéria orgânica de uma amostra quimicamente mais complexa do que a tratada pelo referido documento: uma amostra proveniente de um rio poluído, classificada pela legislação vigente como água superficial.

[0049] Já o artigo científico intitulado "*A comparative study on the efficiency of ozonation and coagulation-flocculation as pretreatment to activated carbon adsorption of biologically stabilized landfill leachate.*"

Waste Management, 43, 335-342" investiga o potencial da coagulação-floculação e ozonização para o pré-tratamento do lixiviado biologicamente estabilizado antes da adsorção do carvão ativado granular (GAC). Tanto o cloreto de ferro (III) (FeCl_3) quanto o cloreto de polialumínio (PACl) são investigados como coagulantes. Melhor remoção de matéria orgânica foi observada quando o lixiviado foi tratado com FeCl_3 .

[0050] Primeiramente, observa-se que o documento utiliza as seguintes combinações: Coagulação/floculação, Carvão Ativado Granular (CAG), Ozonização e carvão ativado granular (CAG), ou seja, o tratamento do documento é diferente do proposto na presente invenção, que compreende: Coagulação/Floculação-Ozonização associada à cavitação hidrodinâmica e adsorção utilizando carvão ativado em pó (CAP). Além disso, utilizou um lixiviado submetido previamente a um tratamento biológico antes de ser submetido ao processo de tratamento. Na invenção proposta os efluentes não passam por nenhum pré-tratamento.

[0051] No referido artigo, o tempo necessário para execução do tratamento de Coagulação/Floculação com Cloreto Férrico (FeCl_3) e Adsorção CAG foi de 258 minutos (4h 18min) e no tratamento de ozonização com adsorção CAG foram necessários 240 minutos (4horas). Por outro lado, para a realização do tratamento utilizando a presente invenção proposta são necessários apenas 200 minutos (3h 20min).

[0052] Ainda no referido documento, para a Coagulação/Floculação com Cloreto Férrico (FeCl_3) e Adsorção CAG foi alcançada uma redução de 53% de DQO e na combinação de ozonização com adsorção CAG foram alcançados 77% de

redução de DQO. Por outro lado, a presente invenção obteve valores de redução de DQO de 81,7 a 85,7%, redução de cor de 90,0 a 97,3% e turbidez de 6,25 a 63,2%.

[0053] Com isso, a presente invenção apresenta vantagens de menor tempo para realização do tratamento, com menor custo de processo, acentuada redução de DQO (81,7 a 85,7%) e por não necessitar de pré-tratamento do efluente.

[0054] No trabalho de Li *et al.* (2010), intitulado "*Treatment of stabilized landfill leachate by the combined process of coagulation/flocculation and powder activated carbon adsorption. Desalination*, v. 264, n. 1-2, p. 56-62, 2010" experimentos foram conduzidos para investigar se o processo combinado de coagulação/floculação e adsorção de carvão ativado em pó (CAP) era um método de tratamento eficiente para lixiviado de aterro sanitário estabilizado. Em experimentos de coagulação/floculação, coagulantes incluindo sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), cloreto férrico (FeCl_3), cloreto de polialumínio (PACl) e sulfato poliférrico (PFS) foram empregados para estudar as condições ideais para a remoção de COD, SS e turbidez por testes de jarro. O pH de trabalho ideal para os coagulantes testados foi de 5,5-6,0, o que confirmou a neutralização de carga como o principal mecanismo do processo de coagulação/floculação.

[0055] Em contrapartida, a presente invenção utiliza a coagulação/floculação com ozonização associada à cavitação hidrodinâmica e adsorção utilizando carvão ativado em pó (CAP). Adicionalmente, no referido documento o tempo do tratamento por coagulação/floculação com adsorção com carvão ativado em pó (CAP) foi de até 25 horas, e houve redução de DQO de 53 a 70%. Na presente invenção, o tempo necessário

para o tratamento é de 200 minutos (3 h 20 min), obtendo-se uma remoção de DQO superior (81,7 a 85,7%). Ao se utilizar o coagulante $PG\alpha 21Ca$, obteve-se ainda remoções superiores a 90%. Cabe ainda salientar que o estudo de Li *et al.* (2010) utilizou uma quantidade de Carvão Ativado em Pó (CAP) 10 vezes superior à quantidade utilizada na presente invenção e uma dosagem de cloreto férrico e alumínio, na forma de sulfato de alumínio, duas vezes superior à da presente invenção.

[0056] Assim, a presente invenção ainda apresenta a vantagem de usar menor quantidade de CAP, cloreto férrico e sulfato de alumínio, além de ter um tempo de contato menor e apresentar maiores percentuais de remoção de DQO, e assim, menor custo. Ainda, o tempo total de contato da presente invenção é cerca de 9 vezes inferior ao do referido documento, necessitando de menos tempo para a realização de todo o processo de tratamento.

[0057] O documento "*Stabilized leachates: ozone-activated carbon treatment and kinetics.*" de Rivas *et al.* (2003) tratou um lixiviado estabilizado por ozonização por coluna de borbulhamento com catálise heterogênea e posteriormente por adsorção com carvão ativado comercial. Foram relatados níveis de remoção de até 90% da DQO em aproximadamente 120 h para dosagens de adsorvente de 30 g.L⁻¹.

[0058] A presente invenção se diferencia por empregar as técnicas de coagulação/floculação com ozonização associada à cavitação hidrodinâmica e adsorção utilizando carvão ativado em pó (CAP). Destaca-se ainda que no referido documento, o sistema de tratamento possui uma coluna de

borbulhamento por fluxo ascendente, com ozonização por contato e geração de bolhas maiores do que as da presente invenção. Isto é, o sistema de cavitação hidrodinâmica da presente invenção ocorre por sucção do gás ozônio, formando micro a nano bolhas no sistema, em um menor tempo de oxidação e contato. Em relação à remoção de DQO alcançada por Rivas *et al.* (2003), na presente invenção foi possível reduzir a DQO de 81,7 a 85,7% utilizando apenas 1 g.L⁻¹ de carvão ativado em pó em 200 minutos (3h 20 min) de tratamento, enquanto o tempo gasto para o tratamento do documento acima resultou em 5 dias.

[0059] Ademais, os catalisadores de platina e óxido de cobalto empregados no documento citado elevam o custo do processo, assim como as grandes quantidades de carvão ativado utilizadas (pelo menos 30 vezes maiores do que a presente invenção). Ainda se pontua que na invenção proposta foi utilizado carvão ativado em pó, aplicação na qual possibilita maior superfície de contato no tratamento após processo de ozonização associada à cavitação hidrodinâmica. Em contrapartida, Rivas *et al* (2003). utilizaram o carvão ativado da marca *Norit 0,8* do tipo *pellet*, de maior granulometria e maior custo.

[0060] Soma-se a isso o fato que a presente invenção faz produção de ozônio diretamente do ar atmosférico, não necessitando da aquisição de oxigênio ultrapuro, que tem um custo elevado.

[0061] Por fim, o trabalho intitulado "*An overview of landfill leachate treatment via activated carbon adsorption process*" Foo *et al.* (2009), se refere a uma revisão abordando o uso de carvão ativado para tratamento de

lixiviado em diferentes combinações de processos. No entanto, este documento faz referência à combinação de ozonização com adsorção utilizando carvão ativado comercial, processos que apresentam diferenças com o proposto na presente invenção, as quais já são apontadas na discussão de Rivas *et al.* (2003) acima.

[0062] Além disso, Foo *et al.* (2009) foca a sua abordagem somente no uso de carvão ativado, não versa sobre os novos e possíveis tratamentos. A presente invenção, em comparação, sugere um procedimento de coagulação/floculação com a ozonização associada à cavitação hidrodinâmica seguida de uma etapa de adsorção de carvão ativado em pó. Com isso, é possível obter resultados extremamente satisfatórios em tratabilidade em um curto período de tempo, sem a necessidade de adição de catalisador e utilizando uma quantidade muito menor de carvão ativado quando comparado aos procedimentos relatados na literatura. De forma surpreendente, os inventores observaram que o processo da presente invenção leva à redução de tempo e menor quantidade de carvão ativado necessária, reduzindo de sobremaneira os custos do procedimento proposto.

[0063] Assim, partindo do universo de documentos do estado da técnica, observa-se ainda que os ensinamentos não sugerem ou antecipam a presente invenção de maneira isolada ou combinada, caracterizando-a como uma solução técnica com efeito superior ao estado da técnica para o processo de tratamento de efluentes e/ou águas residuárias.

Breve descrição da invenção

[0064] A presente invenção se refere a um processo para o tratamento de efluentes e/ou águas residuárias

compreendendo etapas de coagulação/floculação, ozonização, cavitação hidrodinâmica e adsorção com carvão ativado em pó.

[0065] A presente invenção possui aplicação nas indústrias de tratamento de efluentes domésticos e industriais, tratamento de esgoto e tratamento de água, para saneamento básico e gestão de resíduos sólidos.

Breve descrição das figuras

[0066] Na Figura 1 é apresentado em 1a) o poço de bombeamento, 1b) o tanque de armazenamento de lixiviado e 1c) a bombona de coleta de lixiviado.

[0067] Na Figura 2 é apresentado em 2a) um equipamento *Jar test* (teste de jarro) para determinação de ensaios de floculação contendo lixiviado em diferentes pH e 2b) amostras coletadas para análises.

[0068] Na Figura 3 é apresentado em 3a) um frasco de 20 L e 3b) um rotor de mistura de 1000 rpm.

[0069] Na Figura 4 é apresentada uma imagem 3D da planta de tratamento da presente invenção, em que são representados, em 4a) o tanque de armazenamento em inox, 4b) uma bomba modelo WEG (0,12 HP/34 220 rpm), 4c) a entrada por Venturi, 4d) um manômetro, 4e) um gerador de ozônio e 4f) uma saída do sistema com solução de iodeto de potássio (KI).

[0070] Na Figura 5 é apresentado 4a) o tanque de armazenamento em inox, 5b) saída com mangueira para medição do off-gás e 4e) o gerador de ozônio.

[0071] Na Figura 6 é apresentado o aparato para quantificação de ozônio, em que 6a) representa uma haste com pedra porosa pela qual a mangueira de saída do ozonizador é acoplada a uma coluna de ozonização, 6b) representa solução de iodeto de potássio (KI) 2% com 200 ml por 1 minuto, 6c)

representa solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) 2,0 N (10 ml), 6d) representa solução de tiosulfato de sódio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) 0,1 N e a solução de amido (solução indicadora) é representada em 6e).

[0072] Na Figura 7 é apresentado um gráfico de precipitação pluviométrica no período de outubro a dezembro de 2018 e 2019.

[0073] Na Figura 8 é apresentado um gráfico da biodegradabilidade do lixiviado via O_3/CH .

[0074] Na Figura 9 é apresentado um gráfico da relação entre pH e coagulantes para o parâmetro cor.

[0075] Na Figura 10 é apresentado um gráfico da relação entre pH e coagulantes para o parâmetro DQO.

[0076] Na Figura 11 é apresentada a remoção de DQO para o tratamento completo com o coagulante $\text{PG}\alpha 21\text{Ca}$.

[0077] A Figura 12 apresenta a variação da cor nas amostras de C/F com Cloreto de Alumínio (AlCl_3), a) antes da O_3/CH e b) após a O_3/CH .

[0078] Na Figura 13 é apresentado o tratamento completo, utilizando como coagulação/floculação o Cloreto de Alumínio (AlCl_3).

[0079] Na Figura 14 é apresentado o tratamento completo, utilizando para coagulação/floculação o coagulante cloreto férrico (FeCl_3).

[0080] Na Figura 15 apresentam-se as reduções de DQO, cor e turbidez antes (a) e após (b) o tratamento completo.

Descrição detalhada da invenção

[0081] A presente invenção se caracteriza por ser um processo para o tratamento de efluentes e/ou águas residuárias compreendendo etapas de coagulação/floculação

aplicados anteriormente à ozonização, cavitação hidrodinâmica e posteriormente aplicado polimento com carvão ativado em pó.

[0082] O processo da presente invenção compreende as seguintes etapas: A) adicionar coagulante ao efluente, com processo de mistura rápida realizado por 20 minutos a 700 rpm de agitação; B) deixar o efluente em repouso por 20 minutos para sedimentação dos flocos formados; C) transferir o efluente para o sistema de cavitação hidrodinâmica e ozonização; D) alimentar o reator com fluxo nominal de ozônio de $1830 \text{ mgO}_3 \cdot \text{h}^{-1}$ através de um gerador de ozônio (4e) com fluxo de ar atmosférico de $5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, temperatura entre 20 e 25°C , preferencialmente 24°C e pH entre 8,0 a 8,5, preferencialmente 8,3; E) operar o sistema de cavitação e ozonização por duas horas de tratamento; F) direcionar o efluente tratado para uma etapa de polimento com carvão ativado; e G) realizar o polimento por meio da adição de $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ de carvão ativado ao lixiviado tratado, sob agitação a 100 rpm durante 20 minutos, com posterior repouso de 20 minutos.

[0083] O sistema de cavitação hidrodinâmica é composto por um tanque de armazenamento resistente ao ozônio, selecionado dentre vidro, teflon e inox, preferencialmente em inox (4a), bomba (4b) e entrada Venturi (4c), manômetro (4d) com pressão de operação de 50000 e 100000 Pa, preferencialmente $50 \times 10^3 \text{ Pa}$.

[0084] Ainda no processo da presente invenção o coagulante é selecionado a partir de cloreto de alumínio (AlCl_3), cloreto férrico (FeCl_3) ou $\text{PG}\alpha 21\text{Ca}$.

[0085] Preliminarmente ao processo da presente invenção, as matrizes ambientais foram coletadas para determinação de suas características e definição dos parâmetros utilizados no processo, conforme disposto a seguir.

Coleta do Lixiviado no Aterro Delta 1 A

[0086] O Aterro Sanitário DELTA 1 A iniciou sua operação em caráter emergencial, em setembro de 1992. O Aterro encontra-se fora de operação desde abril de 2014 e possui uma área total de aproximadamente 400 000 m² de área para disposição dos resíduos sólidos coletados no município totalizando o recebimento de 1550t. O Aterro teve sua vida útil por cerca de 22 anos (1992-2014) e após o encerramento de suas atividades a geração de lixiviado tem aumentado a cada ano devido principalmente dos efeitos pluviométricos e da própria degradação da matéria orgânica no interior das células desativadas.

[0087] O aterro conta com um único tanque de armazenamento de lixiviado, que é coletado semanalmente por caminhão e transportado até a ETE SANASA Piçarrão.

[0088] O lixiviado foi coletado em bombonas de 20 Litros, cerca de 150 litros a cada coleta, iniciadas em dezembro de 2018 para testes no reator. A coleta foi realizada na saída da tubulação a partir do poço e bombeamento, ao lado tanque de armazenamento de lixiviado do aterro Delta 1 A (Figura 1), localizado no município de Campinas-SP.

[0089] A coleta de lixiviado foi realizada a cada 3 meses, a partir de dezembro de 2018, com autorização documental junto à DLU. Assim que foram coletadas, as

amostras foram armazenadas a 4 °C em refrigeradores no Laboratório de protótipos (LABPRO) e analisadas no Laboratório de Saneamento (LABSAN) da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas-SP (UNICAMP).

Caracterização do Lixiviado e Ensaio Laboratoriais

[0090] As metodologias analíticas dos experimentos foram realizadas para a caracterização do lixiviado bruto e tratado. A Tabela 1 abaixo apresenta os parâmetros físico-químicos de monitoramento do sistema.

Tabela 1 - Resumo de análises físico-químicas e metodologias utilizadas

Parâmetro	Unidade	Referência	Limite Máximo CONAMA 430/2011
pH	pH	pH digital (Digimed DM-2)	5 a 9
Cor	mg Pt-Co.L ⁻¹	Método 8025 Método platina-cobalto	Até 75
Turbidez	NTU	Turbidímetro (2100 N, HACH)	
Condutividade	mS.cm ⁻¹	Condutivímetro elétrico	
COT	mg.L ⁻¹	Método 5310 B - Analisador de carbono - Combustão a 680°C (Shimadzu, TOC-LCPH)	-
DQO	mg.L ⁻¹	APHA 5220 D - Refluxo fechado, método colorimétrico	-
DBO ₅	mg.L ⁻¹	APHA 5210 Incubação de 5 dias com monitoramento de oxigênio	120,0-
Compostos que absorvem	ABS 254nm (UV ₂₅₄)	Absorbância molecular UVVis	-

radiação UV-Vis 254		em 254 nm - espectrofotômetr o (HACH LANGE, DR/5000)	
Nitrogênio amoniaco (NH ₃ - N), Nitrato (NO ₃), Nitrito (NO ₂)	mg.L ⁻¹	Método 8038, 8039, 8153 espectrofotômetr o HACH DR/2010	20,0; 10,0;1,0 (respecti vamente)
Alumínio (Al)	mg.L ⁻¹	Espect. Absorção atômica - Comp. Onda (nm) (nm) 309,3 Larg. (nm) 0,5 Chama - Acet./Óx. Nitroso	-
Cádmio (Cd)	mg.L ⁻¹	Espect. Absorção atômica - Comp. Onda (nm) 228,8 Larg. (nm) 0,5 Chama - Acetileno	0,2
Chumbo (Pb)	mg.L ⁻¹	Espect. Absorção atômica - Comp. Onda (nm) 247,4 Larg. (nm) 1,0 Chama - Óx. Nitroso	0,5
Cobre (Cu)	mg.L ⁻¹	Espect. Absorção atômica - Comp. Onda (nm) 324,8 Larg. (nm) 0,5 Chama - Acetileno	1,0
Cromo (Cr)	mg.L ⁻¹	Espect. Absorção atômica - Comp. Onda (nm) 357,9 Larg. (nm) 0,2 Chama - Óxido nitroso	0,5
Ferro (Fe)	mg.L ⁻¹	Espect. Absorção atômica - Comp. Onda (nm) 248,3 Larg. (nm) 0,2 Chama - Acetileno	15,0
Mercúrio (Hg)	mg.L ⁻¹	Vapor a frio Comp. Onda (nm) 253,7 Larg. (nm) 0,5	0,01

Zinco (Zn)	mg.L ⁻¹	Espect. Absorção atômica - Comp. Onda (nm) 213,9 Larg. (nm) 1,0 Chama - Acetileno	5,0
Toxicidade aguda	CE _{50,5 min} (%)	luminescente - Vibrio fisheri (Sistema Microtox®),	Não toxicidade
Espectrômetro de massas com analisador quadrupolo (EM-EM)	m/z	GC-MS, com acetato de etila sem e com cloreto de sódio	-

[0091] As análises foram realizadas de acordo com os métodos descritos no *Standard Methods of Water and Wastewater* (APHA, 2005), bem como ensaio de toxicidade proposto por CETESB L5.227/2001 e padrões de lançamento de efluentes Resolução CONAMA nº. 430/2011.

[0092] A Tabela 2 a seguir apresenta as características do lixiviado bruto do Aterro Delta 1 A de Campinas-SP. As amostras foram coletadas mensalmente de outubro de 2018 a dezembro de 2019, com exceção de março a junho/2019, devido à quantidade de lixiviado coletada em fevereiro para realização de experimentos.

Tabela 2 - Características do lixiviado do aterro Delta 1 A (2018-2019)

Coleta	pH	Cor (mgPt-Co.L ⁻¹)	Turbidez (NTU)	DQO (mg.L ⁻¹)	Condutividade (mS.cm ⁻¹)
OUT/2018	7,95	4850	12,6	2185	13,76
NOV/2018	8,05	4930	4930	4930	4930
DEZ/2018	8,26	8,26	8,26	8,26	8,26
JAN/2019	7,97	7,97	7,97	7,97	7,97
FEV/2019	7,99	7,99	7,99	7,99	7,99

JUL/2019	8,49	8,49	8,49	8,49	8,49
AGO/2019	7,97	7,97	7,97	7,97	7,97
OUT/2019	8,09	8,09	8,09	8,09	8,09
NOV/2019	8,45	8,45	8,45	8,45	8,45
DEZ/2019	7,94	7,94	7,94	7,94	7,94
MÉDIA	8,02	8,02	8,02	8,02	8,02

[0093] Os valores de pH registrados para lixiviados na presente invenção estão na faixa de 7,94 a 8,29, ou seja, faixa alcalina.

[0094] Para Hussein *et al.* (2019), o pH do lixiviado torna-se alcalino conforme a estabilização natural, devido à diminuição da concentração de ácidos graxos voláteis livres parcialmente ionizados, que estão sendo utilizados pelas bactérias produtoras de metano (HUSSEIN, M., YONEDA, K., ZAKI, Z. M., OTHMAN, N., & AMIR, A. (2019). *Leachate Characterizations and Pollution Indices of Active and Closed Unlined Landfills in Malaysia. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 100232.).

[0095] A Figura 7 mostra a precipitação pluviométrica entre os meses de coleta de lixiviado no aterro (out-2018 a dez-2019).

[0096] As concentrações de DQO do lixiviado de aterro variaram de 1950 a 3840 mg.L⁻¹ durante o verão de 2018/2019 e de 3310 a 3530 mg.L⁻¹ no inverno de 2019, ou seja, conforme a Figura 7 mostra, nos meses de estiagem a DQO está mais alta do que nos meses de verão em que as chuvas contribuem para a diluição do lixiviado, sendo que as coletas foram realizadas sempre entre os dias 25 a 30 para cada mês.

Eficiência de Remoção

[0097] A eficiência de remoção de cor, turbidez e DQO foi calculada usando a seguinte Equação (1).

$$\text{Eficiência de remoção (\%)} = \frac{[(C_i - C_f)]}{C_i} \times 100 \text{ Equação (1)}$$

onde C_i e C_f são atribuídas às concentrações de cor/turbidez (absorvância) e DQO inicial e final, respectivamente.

[0098] Observa-se na Figura 8 o comportamento da DQO no processo de tratamento único a fim de verificar a funcionalidade do reator e eficiência de remoção.

[0099] Neste estudo, o lixiviado concentrado foi tratado unicamente com O_3/CH , tendo remoções de tratamento final após 6 horas em média de DQO ($1288,0 \text{ mg.L}^{-1}$), cor verdadeira ($188,7 \text{ mg Pt-Co.L}^{-1}$), turbidez (3,3 NTU) e pH (9,3), em média, uma remoção de DQO 36,14%; cor 94,90% e turbidez 70,27%. Rivas *et al.* (2003) obtiveram remoção de DQO de 30% após 1h de ozonização lixiviados estabilizados com características próximas a presente invenção.

[00100] Conforme a Figura 8, a eficiência de remoção de DQO para os três tratamentos foi estabilizada a partir das 2 horas, não havendo mudanças acentuadas após esse período, ou seja, a eficiência de remoção de DQO para as 2 horas foi de 36,24% enquanto que para 6 horas foi de 32,13%, valores estes que são considerados próximos. Desse modo, o tempo de 2 horas foi escolhido como ponto de partida para os tratamentos posteriores no reator.

Definição de pH e coagulação/floculação (C/F) via Jar test

[00101] O ensaio no equipamento *Jar test* foi realizado com o lixiviado e três coagulantes separadamente: cloreto de alumínio ($AlCl_3$) marca Dinâmica, cloreto férrico ($FeCl_3$)

marca *Synth* e o PG α 21Ca marca *NIPPON POLY-GLU*, para verificar os pH ótimos de tratabilidade observados na Figura 2.

[00102] Inicialmente foram identificados os frascos, seis (6) por vez, preenchidos com 500 ml de lixiviado *in natura*, o pH foi ajustado durante a mistura usando HCl 0,1 mol. L⁻¹ ou 0,1 mol. L⁻¹ NaOH, definidos em pH *in natura*; 4; 5; 6; 7 e 8. Foi adicionado 1g.L⁻¹ de cada coagulante em cada frasco seguido de mistura rápida (100 rpm) por 10 min e 10 min de mistura lenta (50 rpm) para floculação.

[00103] A mistura rápida auxilia na coagulação, enquanto a mistura mais lenta promove a formação de flocos, melhorando as colisões de partículas que levam para flocos maiores (RAMAVANDI, 2014). As amostras foram deixadas em repouso por 20 minutos para análise de pH final, cor, turbidez e DQO.

Coagulação/Floculação

[00104] O experimento de coagulação/floculação (C/F) foi realizado no Laboratório de Química do Estado Sólido (LQES-UNICAMP). O lixiviado foi transferido para frascos com capacidade para 20 litros, preenchidos com 5 litros e realizada a agitação por 20 minutos com três tipos de coagulantes: cloreto de alumínio (AlCl₃), marca Dinâmica, cloreto férrico (FeCl₃), marca *Synth*, e PG α 21Ca, marca *NIPPON POLY-GLU*, conforme mostra a Figura 3.

[00105] Realizou-se agitação por 20 minutos em 700 rpm e após a agitação deixou-se em repouso por mais 20 minutos, ao que foi então submetido à filtração em filtro qualitativo para retirada da espuma e transferido para o reator de O₃/CH.

[00106] Os coagulantes utilizados foram: cloreto de alumínio (AlCl_3) marca Dinâmica e cloreto férrico (FeCl_3) marca *Synth*. O coagulante $\text{PG}\alpha 21\text{Ca}$ da marca *Nippon Poly-Glu* foi fornecido em pó e utilizado como descrito por Campos (2016). Todos tiveram dose padronizada em 1 g.L^{-1} .

[00107] A Figura 9 mostra inicialmente o valor do lixiviado bruto (sem tratamento) para se ter um indicativo da tratabilidade em relação aos valores de pH avaliados. Os resultados complementares constam nas Tabelas 3 e 4 abaixo.

Tabela 3 - Concentrações de DQO nos ensaios de pH em *Jar test*

Parâmetro DQO	TRAT. CLORETO FÉRRICO (mg.L^{-1})	TRAT. CLORETO DE ALUMÍNIO (mg.L^{-1})	TRAT. $\text{PG}\alpha 21\text{Ca}$ (mg.L^{-1})
Lix. Bruto	2736,0	2736,0	2736,0
pH 4	1779,0	2257,0	1300,0
pH 5	1181,0	1030,0	1994,0
pH 6	1922,0	2233,0	2592,0
pH 7	2496,0	2377,0	2329,0
pH 8	2640,0	2353,0	2233,0
pH Natural	2233,0	2664,0	2784,0

Tabela 4 - Concentrações de cor nos ensaios de pH em *Jar test*

Parâmetro DQO	TRAT. CLORETO FÉRRICO (mg.L^{-1})	TRAT. CLORETO DE ALUMÍNIO (mg.L^{-1})	TRAT. $\text{PG}\alpha 21\text{Ca}$ (mg.L^{-1})
Lix. Bruto	4130,0	4130,0	4130,0

pH 4	1900,0	1650,0	980,0
pH 5	1490,0	1050,0	1630,0
pH 6	2500,0	1480,0	2870,0
pH 7	4180,0	1990,0	3370,0
pH 8	4060,0	2500,0	3920,0
pH Natural	3740,0	2750,0	4020,0

[00108] A Figura 9 ainda mostra a relação para parâmetro cor e os valores de pH analisados para os três tipos de coagulantes. Observa-se que para o coagulante PG α 21Ca em pH 4 houve uma queda acentuada de 4130,0 mg Pt-Co.L⁻¹ (Lix. Bruto) para 980 mg Pt-Co.L⁻¹ com eficiência de remoção de 76,27% no parâmetro, demonstrando que o pH ótimo foi o pH 4.

[00109] Já para os coagulantes cloreto férrico e cloreto de alumínio adicionados ao lixiviado, houve remoção acentuada em pH 5 e houve decaimento de 4130,0 mg Pt-Co.L⁻¹ (Lix. Bruto) para 1490,0 mg Pt-Co.L⁻¹ (63,92%) e 1050,0g Pt-Co.L⁻¹ (74,58%), respectivamente.

[00110] A Figura 10 apresenta a remoção da DQO para os pH's utilizados com coagulante.

[00111] Conforme a Figura 10, é possível analisar que a utilização do coagulante PG α 21Ca em pH 4 teve remoção acentuada de DQO 52,49% para o PG α 21Ca, comparando ao lix. Bruto, de 2736,0 houve redução para 1300 mg.L⁻¹. Para o cloreto de alumínio houve maior eficiência em pH 5, com DQO 62,35% e concentração de 1030,0 mg.L⁻¹, seguido do cloreto férrico também com maior eficiência em pH 5, com DQO 56,83% e concentração de 1181,0 mg.L⁻¹.

[00112] Contudo, para os ensaios em questão foi observado que o comportamento dos coagulantes nas condições ideais de tratamento foram: pH 4 para coagulante PG α 21Ca; pH 5 para coagulante cloreto de alumínio, e pH 5 para coagulante cloreto férrico.

Método para medição do ozônio - Método Iodométrico

[00113] A medição da geração de ozônio foi realizada de acordo com o Método Iodométrico APHA (2017), no método 2350 E (p.173), conforme aparato na Figura 6.

[00114] O ozonizador foi ligado por 30 min a fim de estabilizar a geração de O₃, após esse período, a mangueira de saída do ozonizador foi acoplada a uma coluna de ozonização por meio de uma haste com pedra porosa (6a), o gás inserido ficou em contato com a uma solução de iodeto de potássio (6b) (KI 2%) com 200 mL por 1 minuto. Posteriormente, o líquido da reação foi coletado para titulação. Antes de titular, foi adicionado ácido sulfúrico (6c) (H₂SO₄) 2,0 N (10 ml) para preservar o iodo que foi liberado após a reação O₃/iodeto. A solução então acidificada foi transferida para um *Erlenmeyer* e titulado com tiosulfato de sódio (Na₂S₂O₃) 0,1 N (6d) até que fosse verificado a coloração amarelo palha. Com uma pipeta foi inserido 1,0 ml de solução de amido (6e) (solução indicadora), e repetiu-se a titulação por mais um tempo até desaparecer a coloração azulada e esta se tornasse transparente, registrando-se o volume de tiosulfato de sódio (Na₂S₂O₃) 0,1 N gasto no final.

[00115] A produção de ozônio foi então calculada pela Equação (2):

$$O_3 \text{ produzido } (mg.min^{-1}) = (A \times N \times 24)/T \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

- A: volume em ml titulado no *Erlenmeyer*;
- N: normalidade da solução de tiosulfato de sódio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) 0,1N;
- T: tempo de borbulhamento do O_3 (minutos);
- 24: fator de conversão.

Reator de Ozonização e Cavitação Hidrodinâmica (O_3/CH)

[00116] O reator utilizado (Figura 4) consiste em um tanque de armazenamento em inox (4a) com capacidade para 20 L conectado a uma bomba (4b) modelo WEG (0,12 HP/3420 rpm), para recirculação do fluido (sistema batelada) por meio de conexões em PVC e entrada por Venturi (4c) placa com orifício concêntrico cônico de 10 mm de diâmetro, a fim de restringir a difusão do ozônio no meio aquoso e um manômetro (4d), com pressão de operação de 0,59 bar ou 0,61 kgf.cm^{-2} (59×10^3 Pa).

[00117] O gerador de ozônio (e) é alimentado com ar atmosférico que é ventilado para descarga em corona no interior do mesmo, marca *AIR PRODUCTS*. Na saída do sistema (f) há uma solução de KI (iodeto de potássio) para a medição de off-gás. Na Figura 5 é apresentado o reator e dispositivos de ligação.

[00118] É possível observar o sistema em funcionamento (Figura 5), o tanque de armazenamento (4a) em sistema de batelada. O sistema é totalmente fechado com vedação e uma saída com mangueira (5b) para medição do off-gás, o gerador de ozônio (4e) contendo fluxo de ar atmosférico de 5 L.min^{-1} . No interior no reservatório há um compartimento para armazenar catalisadores que podem ser usados em processo de catálise heterogênea juntamente com ozônio/cavitação hidrodinâmica, sendo o catalisador

preferencial o Dióxido de Titânio e Titanato. Foi utilizado um fluxo nominal máximo: 1830 mg de $O_3.h^{-1}$ ou 366 mg de $O_3.L^{-1}$. E após 1 hora a 24 °C e pH 8,3 atingiu-se um residual de 16,16 mg de $O_3.h^{-1}$ ou 3,232 mg de $O_3.L^{-1}$ para off-gás no sistema.

[00119] Os ensaios foram realizados em batelada e em triplicata. É possível observar, na Tabela 5, os tempos de contato aplicados nos ensaios de ozonização combinado à cavitação hidrodinâmica (O_3/CH), tendo por finalidade avaliar o potencial de tratabilidade do processo de forma unificada com o lixiviado bruto e sem aditivos.

[00120] Foram transferidos para o reator 5 litros de lixiviado, o fluxo de gás ozônio aplicado nesse ensaio foi de 1,09 $gO_3.h^{-1}$ ou 218,9 $mgO_3.L^{-1}$ atingindo um residual de 9,43 $mgO_3.h^{-1}$ ou 1,88 $mgO_3.L^{-1}$ para off-gás no sistema. O tempo de contato do lixiviado foi de 6 horas, em que a cada hora foi retirada uma alíquota para análise.

[00121] Para investigar o efeito combinado de O_3/CH , os ensaios foram realizados em pressão de entrada de 0,59 bar (59×10^3 Pa) ou 0,61 $kgf.cm^{-2}$ e pH (médio) da solução de 8,09. A taxa de alimentação do ozônio foi de 1,09 $g.h^{-1}$, o ozônio foi injetado na entrada do Venturi diretamente para se obter os efeitos cavitacionais.

Tabela 5 - Tratabilidade em reator O_3/CH

TEMPO (horas)	DQO ($mg.L^{-1}$)			Cor ($mg Pt-Co.L^{-1}$)		
	OCH1	OCH1	OCH1	OCH1	OCH1	OCH1
0	2401	1786	1864	3310	4220	3560
1	1803	1440	1788	1270	585	885
2	1300	1135	1674	670	467	332
3	1324	1152	1308	440	450	237

4	1348	1200	1358	259	222	196
5	1085	1117	1423	194	206	156
6	1324	1164	1376	168	223	175
TEMPO (horas)	Turbidez (NTU)			pH		
	OCH1	OCH1	OCH1	OCH1	OCH1	OCH1
0	9,92	12,7	10,6	7,97	8,45	8,09
1	11,4	10,7	7,74	8,56	8,41	8,83
2	7,93	7,1	2,62	8,70	8,92	9,08
3	8,71	2,30	3,15	8,82	9,18	9,17
4	6,50	2,23	3,36	8,97	9,24	9,25
5	4,55	2,41	2,94	9,10	9,28	9,32
6	4,22	2,94	2,78	9,17	9,31	9,30

*OCHn - Ozonização combinada a cavitação hidrodinâmica.

[00122] A Tabela 5 acima mostra que o lixiviado *in natura* bruto (tempo zero) possui valor médio inicial de DQO (2017,0 mg.L⁻¹); cor verdadeira (3696,7 mg Pt-Co.L⁻¹); turbidez (11,1 NTU) e pH (8,2).

[00123] Segundo Gore *et al.* (2014), a injeção de O₃ na entrada da fenda do Venturi da fenda pode agir de três formas: as moléculas de ozônio são diretamente expostas às condições de cavitação e, assim, aumentam a geração de radicais • OH; a turbulência criada à jusante de um dispositivo de cavitação favorece a dispersão do ozônio molecular na solução; e promove maior tempo de contato entre o ozônio e o poluente.

[00124] Dessa forma, o sinergismo para cavitação combinada com ozonização é principalmente devido ao efeito favorável da cavitação hidrodinâmica na geração de turbulência e microcirculação no líquido, proporcionada pelo

o orifício de recirculação da bomba dando o diferencial de pressão e o efeito Venturi.

[00125] Entretanto, foi surpreendentemente constatado pelos inventores que a associação da ozonização com a cavitação hidrodinâmica conforme a presente invenção promove a geração de bolhas menores em relação à ozonização conforme literatura. Este efeito é mais vantajoso tendo em vista o sinergismo da associação dos dois tratamentos, uma vez que há maior degradação de poluentes devido ao potencial de oxidação muito maior.

Adsorção de carvão ativado

[00126] Os experimentos de adsorção foram conduzidos de forma semelhante ao processo da coagulação-floculação. Após o tratamento combinado testado, foram transferidos 500 ml do lixiviado já tratado (CF+O₃/CH) em *jar test* e adicionados 1g.L⁻¹ de carvão ativado marca *Synth*, seguido de mistura (100 rpm) por 20 minutos e repouso por mais 20 minutos. Posteriormente, as amostras foram coletadas e realizadas análises de pH, cor, turbidez e DQO.

Coagulação/Floculação + Ozonização/Cavitação Hidrodinâmica + Adsorção com Carvão Ativado em Pó (C/F+O₃/CH+CAP)

[00127] O processo de tratamento em questão foi realizado em triplicata, porém como não havia sido realizado o *jar test* anteriormente, os pH foram padronizados em pH 5 para os coagulantes.

[00128] As amostras de lixiviado bruto foram agitadas com os coagulantes (C/F), transferidas para o reator O₃/CH por 2 horas e submetidas ao *Jar test* com o carvão ativado em pó (CAP) para polimento final. Foram então retiradas alíquotas para análises de pH, cor, turbidez, DQO e

condutividade. As Tabelas 6, 7 e 8 a seguir apresentam os resultados totais obtidos.

Tabela 6 - Caracterização do tratamento completo em triplicada - Parâmetro Cor

PARÂMETRO COR (mg Pt-Co.L⁻¹)	TRAT. 1 PGα21Ca	TRAT. 2 PGα21Ca	TRAT. 3 PGα21Ca	MÉDIA
Lix. Bruto - <i>in natura</i>	3840,0	3840,0	3840,0	3840,0
Biof. PGα21Ca	1520,0	1760,0	1430,0	1570,0
O ₃ - 1h.	370,0	230,0	280,0	293,3
O ₃ - 2h.	200,0	140,0	160,0	166,7
Após CAP	111,0	72,0	77,0	86,7
EFICIÊNCIA TOTAL (%)	97,1	98,1	98,0	97,7
PARÂMETRO COR (mg Pt-Co.L⁻¹)	TRAT. 1 Cloreto de Alumínio	TRAT. 2 Cloreto de Alumínio	TRAT. 3 Cloreto de Alumínio	MÉDIA
Lix. Bruto - <i>in natura</i>	3840,0	3840,0	3840,0	3840,0
Coag Clor. Alumínio	1190,0	2090,0	1330,0	1536,7
O ₃ - 1h.	210,0	150,0	250,0	203,3
O ₃ - 2h.	140,0	130,0	160,0	143,3
Após CAP	74,0	117,0	115,0	102,0
EFICIÊNCIA TOTAL (%)	98,07	96,95	97,01	97,34
PARÂMETRO COR (mg Pt-Co.L⁻¹)	TRAT. 1 Cloreto Férrico	TRAT. 2 Cloreto Férrico	TRAT. 3 Cloreto Férrico	MÉDIA

Lix. Bruto - <i>in natura</i>	3840,0	3840,0	3840,0	3840,0
Coag. Clor. Férrico	2830	2860	2880	2856,7
O ₃ - 1h.	1020	580	1560	1053,3
O ₃ - 2h.	430	469	1230	709,7
Após CAP	401	230	519	383,3

Tabela 7 - Caracterização do tratamento completo em triplicada - Parâmetro Turbidez

PARAMETRO TURBIDEZ (NTU)	TRAT. 1 PGα21Ca	TRAT. 2 PGα21Ca	TRAT. 3 PGα21Ca	MÉDIA
Lix. Bruto - <i>in natura</i>	11,2	11,2	11,2	11,2
Biof. PGα21Ca	20,1	21,8	18,0	20,0
O ₃ - 1h.	1,6	1,5	2,1	1,7
O ₃ - 2h.	1,3	1,3	1,3	1,3
Após CAP	5,2	3,0	3,4	3,9
EFICIÊNCIA TOTAL (%)	53,8	73,6	69,6	65,6
PARAMETRO TURBIDEZ (NTU)	TRAT. 1 Cloreto de Alumínio	TRAT. 2 Cloreto de Alumínio	TRAT. 3 Cloreto de Alumínio	MÉDIA
Lix. Bruto - <i>in natura</i>	11,2	11,2	11,2	11,2
Coag Clor. Alumínio	12,2	11,2	8,26	10,6
O ₃ - 1h.	2,0	1,24	1,64	1,6
O ₃ - 2h.	1,85	1,22	1,12	1,4
Após CAP	2,73	5,92	3,71	4,1
EFICIÊNCIA TOTAL (%)	75,63	47,14	66,88	63,21

PARAMETRO TURBIDEZ (NTU)	TRAT. 1 Cloreto Férrico	TRAT. 2 Cloreto Férrico	TRAT. 3 Cloreto Férrico	MÉDIA
Lix. Bruto - <i>in natura</i>	11,2	11,2	11,2	11,2
Coag. Clor. Férrico	12,7	18,2	11,1	14,0
O ₃ - 1h.	10,7	9,04	8,31	9,4
O ₃ - 2h.	13,6	9,13	11,5	11,4
Após CAP	10,7	11	9,8	10,5
EFICIÊNCIA TOTAL (%)	4,46	1,79	12,50	6,25

Tabela 8 - Caracterização do tratamento completo em triplicada - Parâmetro DQO

REMOÇÃO DE DQO (mg.L⁻¹)	TRAT. 1 PGα21Ca	TRAT. 2 PGα21Ca	TRAT. 3 PGα21Ca	MÉDIA
Lix. Bruto - <i>in natura</i>	2425,0	2425,0	2425,0	2425,0
Biof. PGα21Ca	1583,0	1348,0	1468,0	1466,3
O ₃ - 1h.	602,0	758,0	746,0	702,0
O ₃ - 2h.	590,0	734,0	662,0	662,0
Após CAP	192,0	172,0	184,0	182,7
EFICIÊNCIA TOTAL (%)	92,1	92,9	92,4	92,5
REMOÇÃO DE DQO (mg.L⁻¹)	TRAT. 1 Cloreto de Alumínio	TRAT. 2 Cloreto de Alumínio	TRAT. 3 Cloreto de Alumínio	MÉDIA
Lix. Bruto - <i>in natura</i>	2425,0	2425,0	2425,0	2425,0
Coag Clor. Alumínio	1396	1898	1492	1595,3

O ₃ - 1h.	686	818	662	722,0
O ₃ - 2h.	674	554	519	582,3
APÓS CAP	363	351	327	347,0
EFICIÊNCIA TOTAL (%)	85,03	85,53	86,52	85,69
REMOÇÃO DE DQO (mg.L⁻¹)	TRAT. 1 Cloreto Férrico	TRAT. 2 Cloreto Férrico	TRAT. 3 Cloreto Férrico	MÉDIA
Lix. Bruto - <i>in natura</i>	2425,0	2425,0	2425,0	2425,0
Coag. Clor. Férrico	1540	1635	2018	1731,0
O ₃ - 1h.	973	638	698	769,7
O ₃ - 2h.	830	483	614	642,3
Após CAP	495	366	470	443,7
EFICIÊNCIA TOTAL (%)	79,59	84,91	80,62	81,70

[00129] Na Figura 11 verifica-se que para o tratamento completo C/F+O₃/CH+CAP, utilizando o coagulante PGα21Ca, as remoções de DQO alcançadas foram promissoras, principalmente em relação à concentração do lixiviado bruto, antes de 2425 mg.L⁻¹ e a concentração após o tratamento, de 182,7 mg.L⁻¹, resultando em uma eficiência de tratamento de 92,5%.

[00130] Em resumo, a utilização de coagulantes associados à POA, tem apresentado resultados satisfatórios mesmo em efluentes de difícil biodegradabilidade.

[00131] Na Figura 12, a coloração marrom escuro inicial do lixiviado bruto pode ser atribuída à presença de substâncias húmicas e à medida que se passa o tempo de contato com o ozônio, a oxidação faz com que a cor mude para um amarelo mais claro.

[00132] Neste contexto, a remoção de cor pode estar relacionada ao ataque direto do ozônio às ligações duplas de carbono no cromóforo, ou seja, ataque às ligações de ácidos alifáticos, cetonas e aldeídos.

[00133] Observa-se que no tratamento completo utilizando o coagulante cloreto de alumínio (AlCl_3), apresentado na Figura 13, as remoções de DQO foram em média 85,7%, valor bastante significativo em um tratamento com lixiviado com alto índice de contaminantes.

[00134] A aplicação do cloreto férrico (FeCl_3) no tratamento completo, apresentado na Figura 14, resultou na menor eficiência de remoção em relação aos outros tratamentos supracitados. Além de obter menor remoção de DQO (81,7%), a utilização do cloreto férrico resultou em uma coloração amarelada no final do tratamento no interior do reator e se manteve constante após a adsorção no carvão ativado.

[00135] Em relação às variações das concentrações de DQO, cor e turbidez após o tratamento completo e adsorção com carvão ativado em pó (Figura 15), ambos os parâmetros foram substancialmente removidos. Para o tratamento completo utilizando o coagulante $\text{PG}\alpha 21\text{Ca}$, os parâmetros de cor, turbidez e DQO tiveram concentrações finais de 86,7 mg Pt-Co.L⁻¹, 3,9 NTU e 182,7 mg.L⁻¹, respectivamente. Já para o tratamento completo utilizando o coagulante cloreto de alumínio (AlCl_3), cor, turbidez e DQO foram reduzidas a 102,0 mg Pt-Co.L⁻¹, 4,1 NTU e 347,0 mg.L⁻¹, respectivamente. E para o tratamento completo utilizando o coagulante cloreto férrico (FeCl_3), cor, turbidez e DQO foram reduzidas a 383,3 mg Pt-Co.L⁻¹, 10,5 NTU e 443,7 mg.L⁻¹.

[00136] Em resumo, o comportamento do coagulante PG α 21Ca e o coagulante cloreto de alumínio tiveram poucas diferenças de tratabilidade, enquanto a utilização do cloreto férrico resultou em uma remoção inferior aos três parâmetros avaliados e a turbidez, que praticamente não houve remoção significativa. Para Li et al. (2010), a utilização da coagulação/floculação associada a adsorção por carvão ativado promove a remoção significativa de DQO.

[00137] Por fim, os resultados obtidos demonstraram que, em se tratando de um aterro encerrado desde 2014 aos 24 anos, atualmente o aterro possui uma geração de lixiviado de cerca de 11400 m³ mensais (abril/2019). Durante o período de monitoramento (out/2018-dez/2019), o lixiviado do aterro apresentou características semelhantes às de aterros considerados estabilizados, com pH em faixas alcalinas de 7,94 a 8,49, DQO entre 1886,0 e 2425,0 mg.L⁻¹ e cor entre 1950,0 e 4930,0 mg Pt-Co.L⁻¹.

[00138] Ao se aplicar os testes de tratabilidade do lixiviado na planta de tratamento da presente invenção, foi possível compreender que o lixiviado tratado por 2 horas teve eficiência de remoção de DQO muito próximas ao de 6 horas, 36,24% para 32,13%, respectivamente, dados estes que auxiliaram na tomada de decisão em fixar os posteriores tratamentos em 2 horas.

[00139] Com base nos ensaios de pH 4 a pH 8, realizados em *jar test* e dosagens padronizadas (1g.L⁻¹), o coagulante PG α 21Ca apresentou melhores resultados em pH 4 com eficiências de remoção de DQO (52,5%) e cor (76,3%). Para o coagulante cloreto de alumínio (AlCl₃) as melhores eficiências foram em pH 5 com remoção de DQO (62,4%) e cor

(74,6%), e para a utilização de coagulante cloreto férrico (FeCl_3) as remoções também foram mais significativas em pH 5, atingindo DQO (56,8%) e cor (63,9%).

[00140] Ao se aplicar o tratamento em conjunto por coagulação/floculação + ozonização e cavitação hidrodinâmica com carvão ativado em pó, os resultados alcançados foram significativos em relação à tratabilidade do lixiviado, para a combinação coagulante $\text{PG}\alpha 21\text{Ca} + \text{O}_3/\text{CH} + \text{CAP}$, as remoções de DQO, cor e turbidez foram 92,5%; 97,7% e 65,6%; respectivamente.

[00141] Para a combinação Coagulante $\text{AlCl}_3 + \text{O}_3/\text{CH} + \text{CAP}$, as remoções de DQO, cor e turbidez foram de 85,7%; 97,3% e 63,2%; respectivamente.

[00142] Já para a combinação Coagulante $\text{FeCl}_3 + \text{O}_3/\text{CH} + \text{CAP}$, as remoções de DQO, cor e turbidez foram 81,7%; 90,0% e 6,25%; respectivamente.

[00143] Entre os três tratamentos realizados, o coagulante $\text{PG}\alpha 21\text{Ca} + \text{O}_3/\text{CH} + \text{CAP}$ se mostrou mais eficiente, porém, com resultados próximos ao tratamento utilizando Cloreto de Alumínio como coagulante. Lembrando que para a realização destes testes os valores de pH foram fixados em pH 5.

[00144] O tratamento utilizando cloreto férrico ocorreu de forma menos eficiente em relação aos outros dois, possivelmente devido à coloração mais alta do coagulante, resultando em uma redução de turbidez baixa em relação aos demais.

[00145] Com isso, a presente invenção se apresenta como uma tecnologia para tratamento de efluentes e/ou águas residuárias, através da qual pode-se obter resultados

satisfatórios em tratabilidade, em um curto período de tempo, sem a necessidade de adição de catalisadores e utilizando uma quantidade muito menor de carvão ativado quando comparado aos procedimentos relatados na literatura.

REIVINDICAÇÕES

1) Processo 4 de tratamento de efluentes e/ou águas residuárias, **caracterizado** por compreender as etapas de:

A) adicionar coagulante ao efluente, com processo de mistura realizado por 20 minutos a 700 rpm de agitação;

B) deixar o efluente em repouso por 20 minutos para sedimentação dos flocos formados;

C) transferir o efluente para o sistema de cavitação hidrodinâmica e ozonização;

D) alimentar o reator com fluxo nominal de ozônio de $1830 \text{ mgO}_3 \cdot \text{h}^{-1}$ através de um gerador de ozônio (4e) com fluxo de ar atmosférico de $5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, temperatura entre 20 e 25°C , e pH entre 8,0 a 8,5;

E) operar o sistema de cavitação e ozonização por duas horas de tratamento;

F) direcionar o efluente tratado para uma etapa de polimento com carvão ativado; e

G) realizar o polimento por meio da adição de $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ de carvão ativado ao lixiviado tratado, sob agitação a 100 rpm durante 20 minutos, com posterior repouso de 20 minutos.

2) Processo, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** por na etapa (A) o coagulante ser selecionado a partir de cloreto de alumínio (AlCl_3), cloreto férrico (FeCl_3) ou $\text{PG}\alpha 21\text{Ca}$.

3) Processo, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** por na etapa (D) a temperatura é 24°C e o pH é 8,3.

4) Processo, de acordo com a reivindicação 1 ou 2, **caracterizado** pelo fato de que a combinação coagulante $\text{PG}\alpha\text{21Ca}$, em reator O_3/CH , com carvão ativado em pó (CAP) e pH 5 da etapa (G) apresentou remoções de DQO, cor e turbidez de respectivamente 92,5%; 97,7% e 65,6%.

5) Processo, de acordo com as reivindicações 1 a 4, **caracterizado** pelos efluentes ou águas residuárias serem selecionados a partir de esgoto doméstico, esgoto de hospitais, efluentes industriais e da agricultura, águas de captação em períodos de estiagem e lixiviado de aterro sanitário.

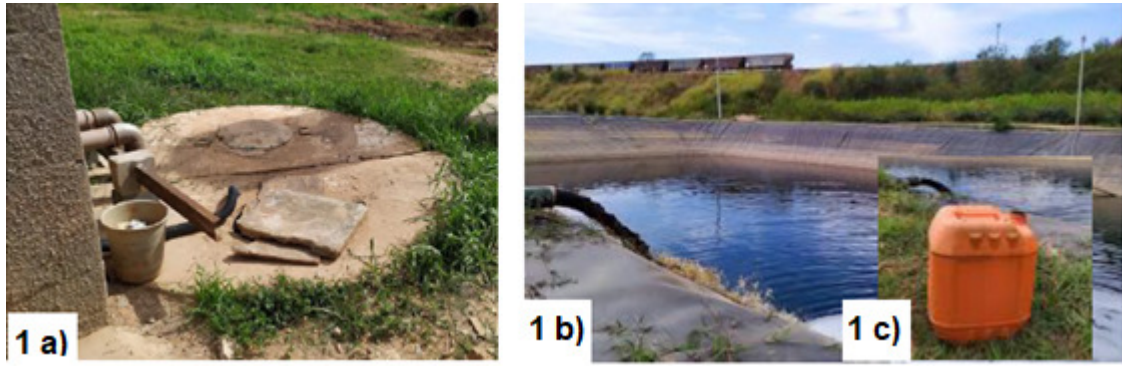


FIGURA 1

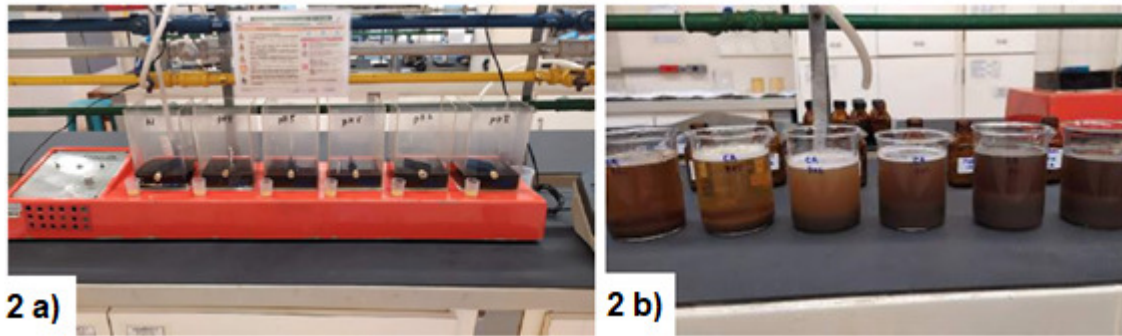


FIGURA 2

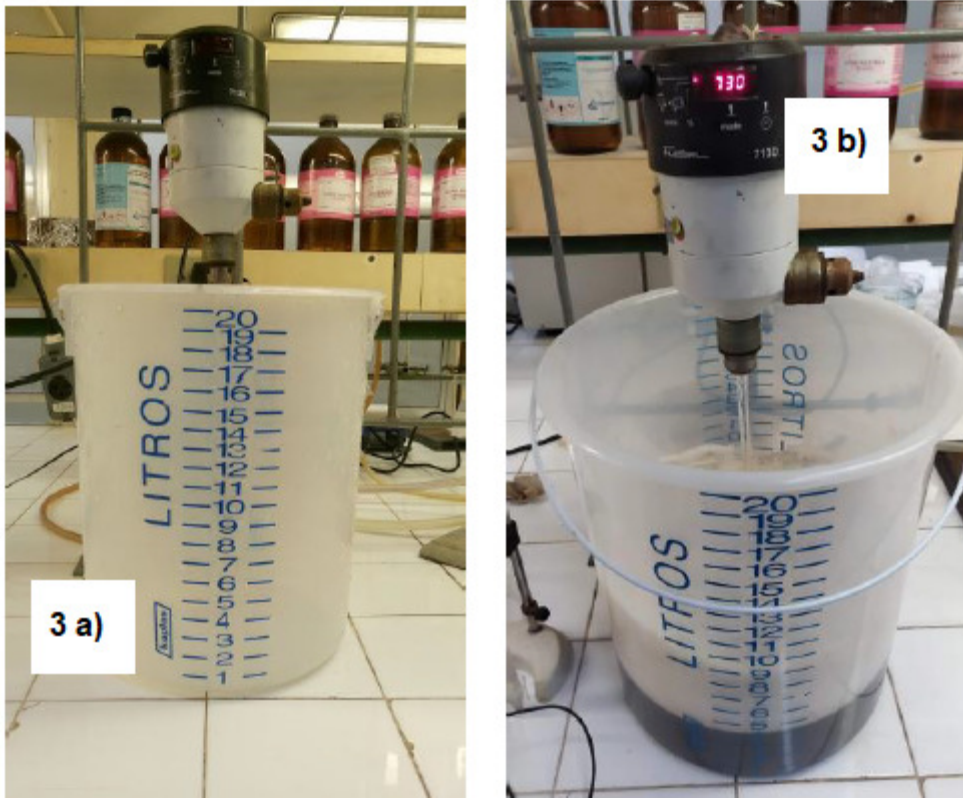


FIGURA 3

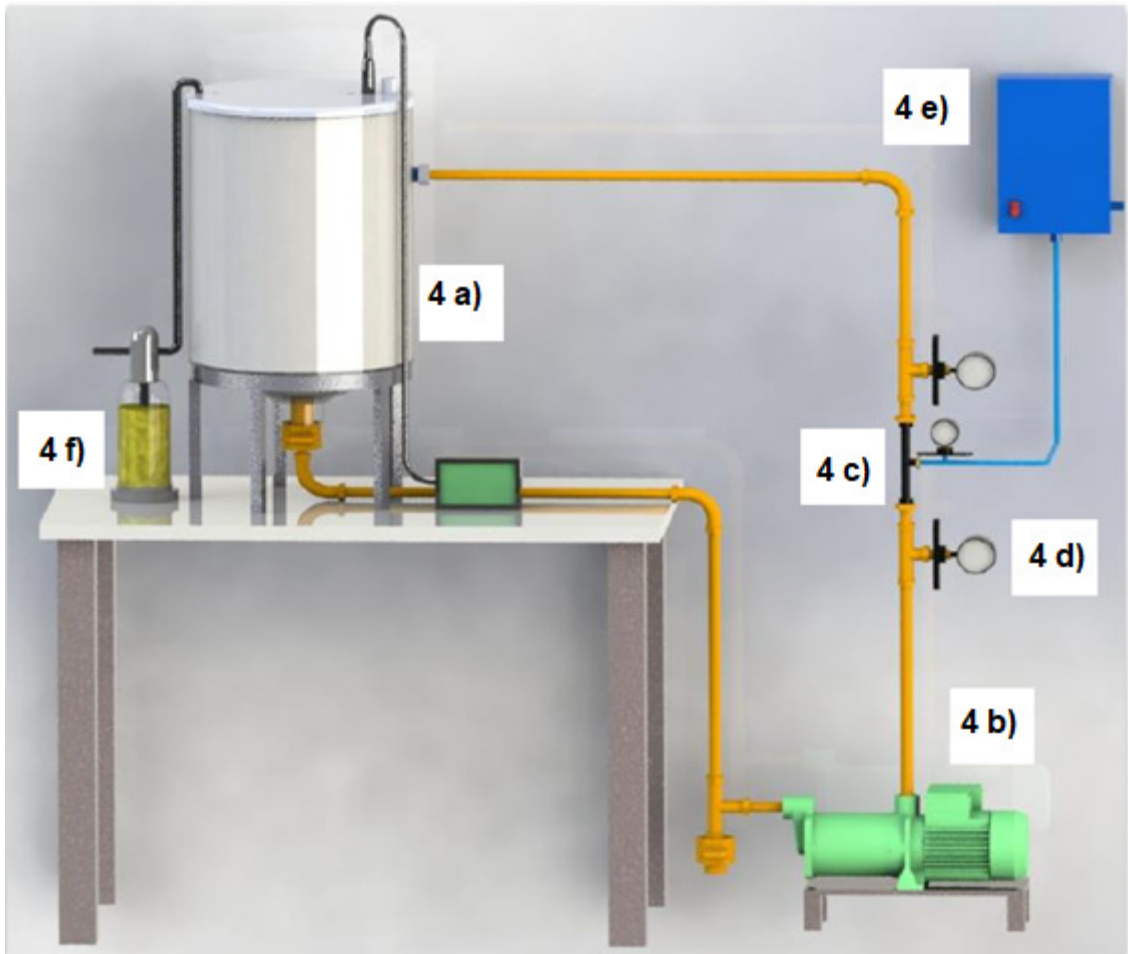


FIGURA 4



FIGURA 5

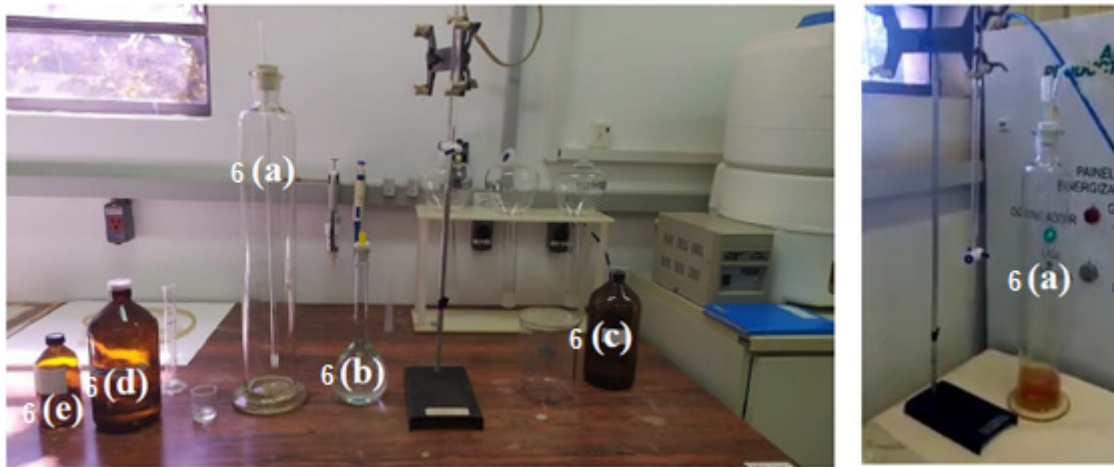


FIGURA 6

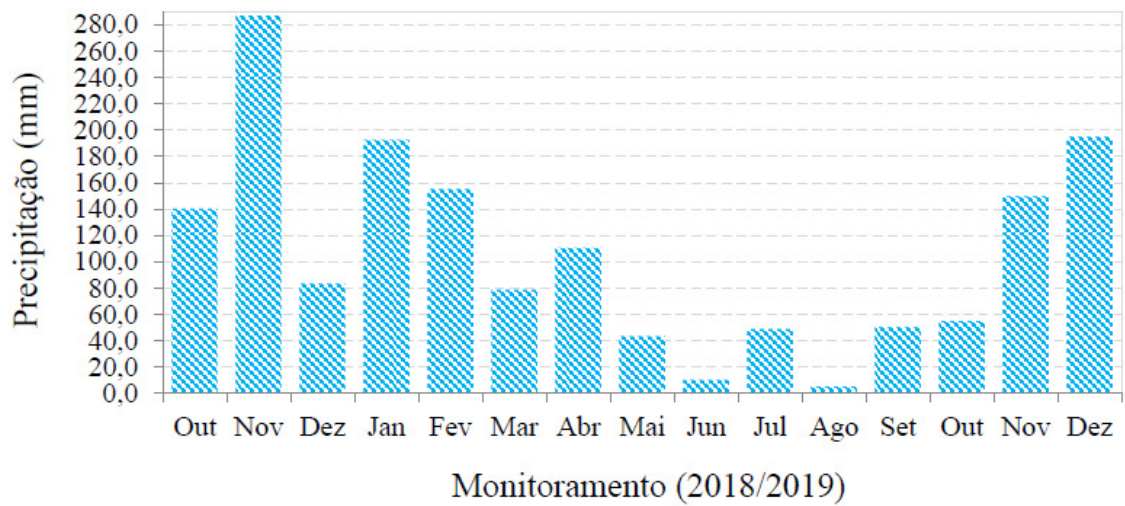


FIGURA 7

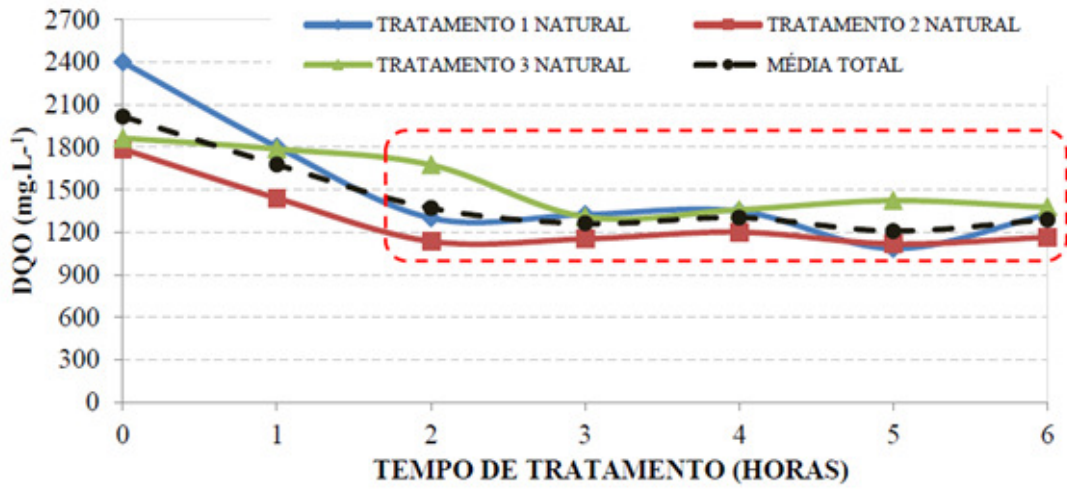


FIGURA 8

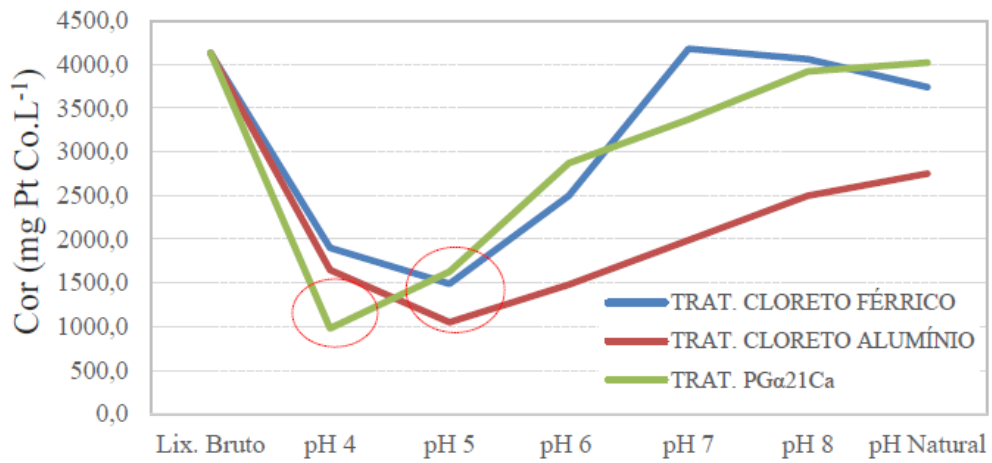


FIGURA 9

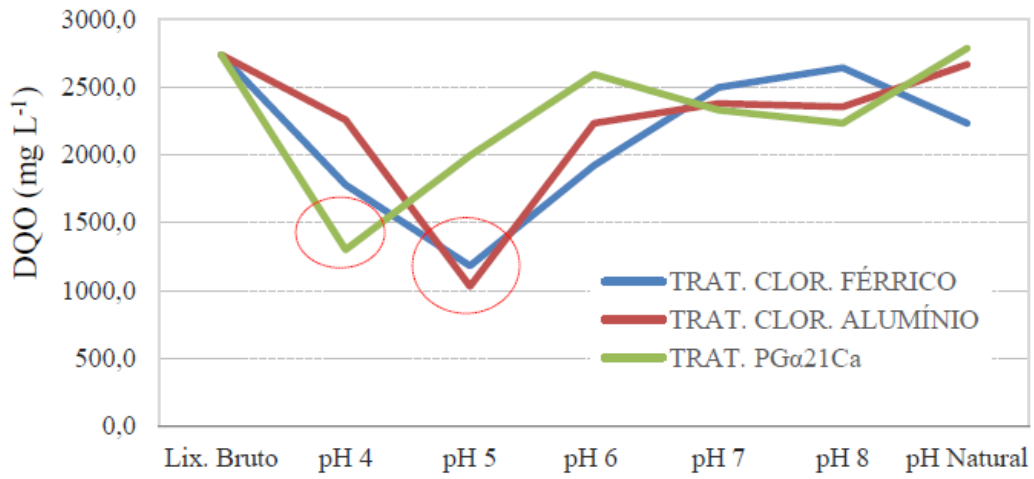


FIGURA 10

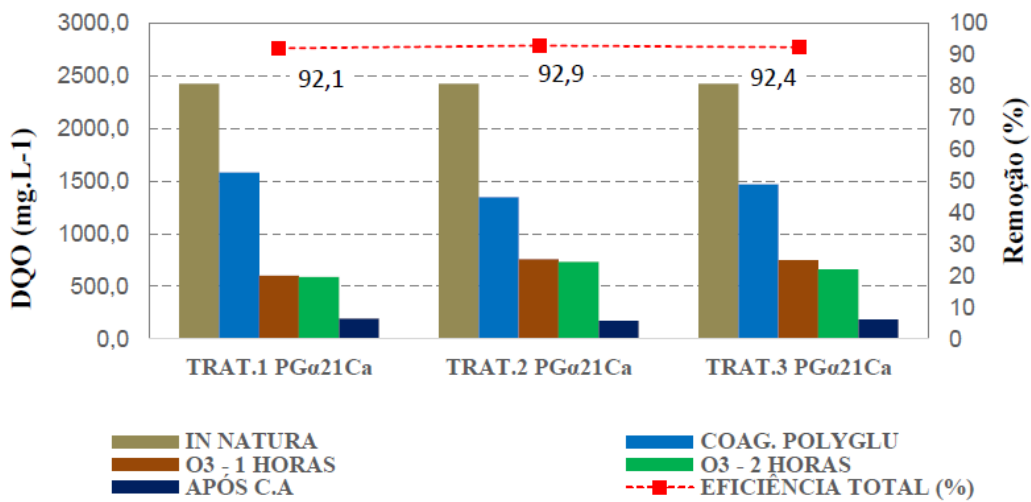


FIGURA 11

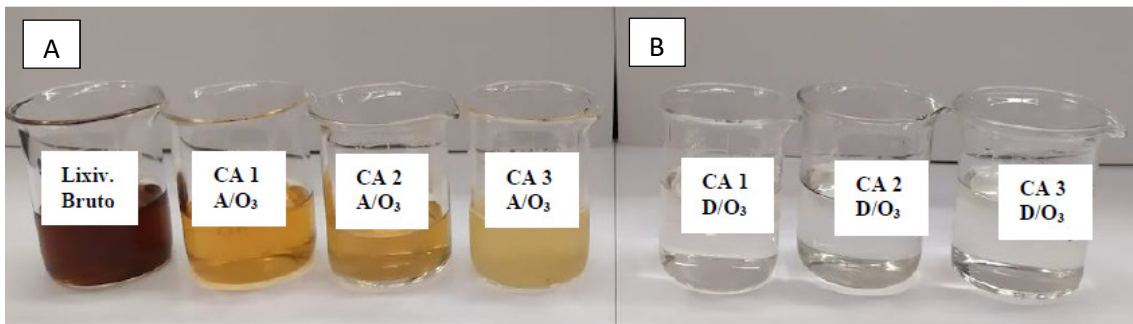


FIGURA 12

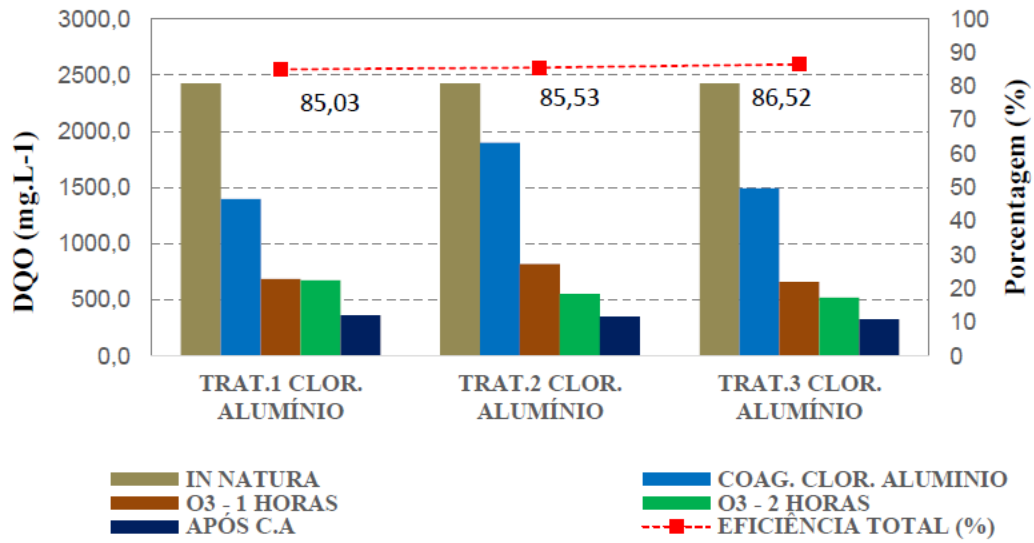


FIGURA 13

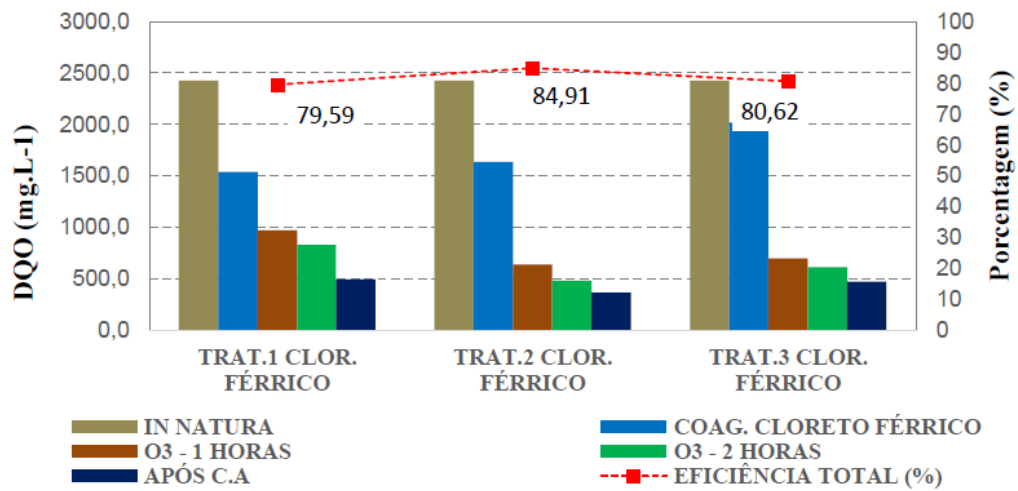


FIGURA 14

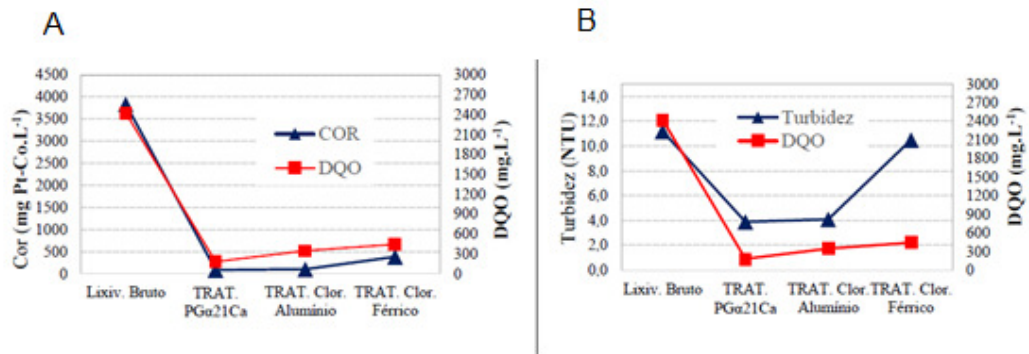


FIGURA 15

RESUMO

**PROCESSO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES E/OU ÁGUAS RESIDUÁRIAS
POR CAVITAÇÃO HIDRODINÂMICA ASSOCIADA À COAGULAÇÃO,
FLOCULAÇÃO, OZONIZAÇÃO E ADSORÇÃO COM CARVÃO ATIVADO EM PÓ**

A presente invenção se refere a um processo para o tratamento de efluentes e águas residuárias compreendendo etapas de coagulação/floculação, ozonização, cavitação hidrodinâmica e adsorção com carvão ativado em pó.

A presente invenção possui aplicação nas indústrias de tratamento de efluentes domésticos e industriais, tratamento de esgoto e tratamento de água, para saneamento básico e gestão de resíduos sólidos.