

# TRATAMENTO DE EFLUENTE DOMISSANITÁRIO SINTÉTICO POR MEIO DA OZONIZAÇÃO CONVENCIONAL E CATALÍTICA HETEROGÊNEA

Andressa de Moura Silva<sup>1</sup>; Camila Marques Alves Aguiar<sup>1</sup>; Maria Zizi Martins Mendonça<sup>2</sup>; Marcio Ricardo Salla<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Graduanda em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Uberlândia

<sup>2</sup>Mestre PPGEC Universidade Federal de Uberlândia

<sup>3</sup>Prof. Dr. na Universidade Federal de Uberlândia

**RESUMO** – O trabalho apresenta a aplicação de processos oxidativos avançados envolvendo o ozônio por meio da ozonização convencional e catalítica na remoção da matéria orgânica carbonácea medida por meio da demanda química de oxigênio (DQO) de efluente domissanitário sintético com concentração média de 327,45 mg DQO/L. Os ensaios foram realizados em pH real do efluente ( $\text{pH} \approx 7,97$ ) e em pH alcalino controlado ( $\text{pH} \approx 10,9$ ) para ambas as ozonizações sendo que para a avaliação da ozonização catalítica foi utilizado o carvão ativado como catalisador. Os parâmetros analisados foram cor, turbidez, DQO e variação de pH e amônia para as vazões de gás ozônio de 60, 120, 240 e 300 L/h nos tempos de contato de 0, 5, 10, 20, 40 e 60 minutos. Ambos processos independentemente do pH foram mais eficientes na vazão de 300 L/h no tempo de contato de 60 minutos. A ozonização catalítica em pH alcalino controlado foi a que apresentou melhores resultados na remoção de cor, turbidez e matéria orgânica do efluente sintético apresentando remoções da ordem de 89%, 87% e 95% respectivamente, mostrando-se bastante satisfatório. Observou-se que a ozonização promoveu a redução do pH durante os ensaios realizados e também foi possível constatar a variação da amônia ao longo do tempo de contato.

**Palavras chaves:** Processos oxidativos avançados, ozônio, efluente sintético, DQO.

## 1. INTRODUÇÃO

O descarte de esgoto sanitário sem tratamento nos rios, lagos e mares é um problema ambiental, social e de saúde pública. O esgoto sanitário é caracterizado principalmente pelo seu alto teor de matéria orgânica, de 400 a 800 mg/L (VON SPERLING, 2014). Os tratamentos de esgoto adotados atualmente são direcionados para o tipo de poluente que é pretendido remover, assim como a eficiência da remoção que é voltada para o atendimento da legislação vigente. Portanto, o tratamento convencional do esgoto doméstico consiste principalmente na remoção da matéria orgânica carbonácea, porém, nem sempre esse tratamento é suficiente para a remoção de agentes patogênicos e diversos micropoluentes como os fármacos, produtos de cuidado pessoal e pesticidas (PINHO, 2017).

O cloro é um desinfectante bastante utilizado tanto nas estações de tratamento de esgoto (ETE) quanto nas estações de tratamento de água (ETA) devido ao baixo custo, facilidade de aplicação e bom poder oxidante (SOARES, 2007). Porém, quando em contato com a matéria orgânica, pode haver a formação de subprodutos organoclorados que inclui os trihalometanos, como

os cancerígenos clorofórmio e ácidos haloacéticos (MASTERS e ELA, 2008). Essas desvantagens do uso do cloro influenciam na busca por alternativas tecnológicas para a desinfecção.

O Processo Oxidativo Avançado (POA) é definido por Glaze et al (1987) como um processo “que envolve a geração de radical hidroxila em quantidade suficiente para afetar a purificação da água”. Os processos mais comuns envolvem as combinações contendo ozônio ( $O_3$ ), peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) e radiação UV, devido a geração do radical hidroxila ( $HO^{\bullet}$ ) que possui grande poder de oxidação capaz de atacar moléculas orgânicas e inorgânicas rapidamente e indiscriminadamente (GOTTSCHALK et al., 2009).

Dentre os POAs, o ozônio possui grande potencial de oxidação ( $E^{\circ} = 2,07 \text{ V}$ ) capaz de oxidar diversos compostos orgânicos presentes nas águas de abastecimento e nas águas residuárias, incluindo resíduos farmacêuticos, produtos de cuidado pessoal, solventes, pesticidas e surfactantes (IKEHATA e LI, 2018). Ainda de acordo com os autores, o ozônio pode reagir com os componentes orgânicos e inorgânicos de duas formas: direta ou molecular e indireta ou radicalar, sendo que as reações diretas são mais seletivas e lentas do que as indiretas que não são seletivas e rápidas. A principal via de degradação da matéria orgânica por meio da reação direta ocorre em meio ácido com pH menor ou igual a 4 enquanto que a degradação por meio da reação indireta ocorre em pH superior ou igual a 9 (CURTI, 2011).

Na ozonização catalítica, o ozônio é utilizado juntamente com catalisadores dissolvidos (homogênea) ou sólidos (heterogênea) para produzir radicais altamente reativos capazes de oxidar diversos compostos (GOTTSCHALK et al., 2009). A formação de radicais é favorecida pela presença de catalisadores sólidos, em que o carvão ativado é um eficiente iniciador da reação de decomposição do ozônio na fase líquida (RODRIGUÉZ et al., 2008).

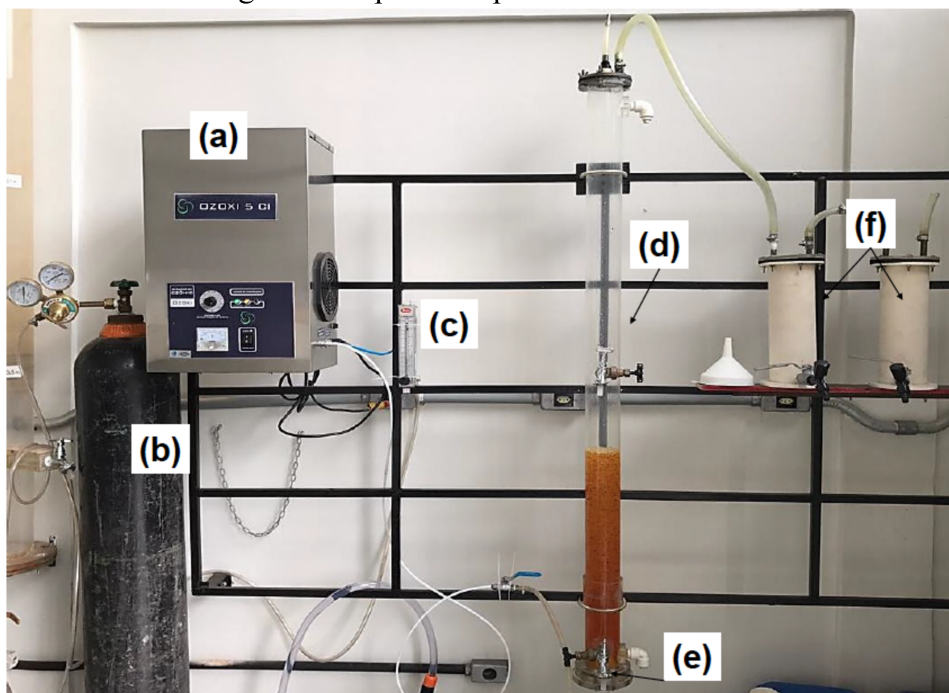
Neste contexto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar os processos de ozonização convencional e ozonização catalítica heterogênea na remoção de matéria orgânica carbonácea em efluente domissanitário sintético no pH real e alcalino do efluente, visto que a literatura indica que a remoção de matéria orgânica é favorecida em meios alcalinos (CURTI, 2011; GOTTSCHALK et al., 2009; IKEHATA e LI, 2018).

## **2. METODOLOGIA**

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Saneamento (LABSAN) da Faculdade de Engenharia Civil (FECIV) da Universidade Federal de Uberlândia – UFU, que conta com um equipamento gerador de ozônio alimentado por um cilindro de oxigênio. O aparato experimental utilizado evidenciado na Figura 1 é composto por um equipamento ozonizador (a),

cilindro de gás (b), rotômetro (c), coluna de ozonização (d), difusor microporoso (e) e dois frascos lavadores de ozônio (f).

Figura 1 – Aparato experimental utilizado.



Fonte: Autora (2018)

A calibração do equipamento ozonizador foi realizada de acordo com o *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998) por meio do método iodométrico para determinar a quantidade de ozônio, em  $\text{gO}_3/\text{h}$ , produzida pelo ozonizador.

O efluente sintético foi preparado de acordo com Oliveira (2001), a partir da metodologia desenvolvida por Torres (1992), para uma DQO de aproximadamente 580 mg/L. A concentração dos constituintes do efluente sintético foi calculado a partir de APHA (1998). O Quadro 1 apresenta a concentração dos constituintes do efluente que foi preparado na quantidade de 4 L imediatamente antes de cada ensaio realizado.

Quadro 1 – Concentração dos constituintes do esgoto sintético.

| Constituinte            | Concentração (mg/L) | Observações                           |
|-------------------------|---------------------|---------------------------------------|
| Extrato de carne        | 208                 | -                                     |
| Glicose                 | 36                  | -                                     |
| Amido comercial         | 112                 | Dissolvido por fervura durante 5 min  |
| Óleo de soja            | 0,055               | Emulsionado com 3 gotas de detergente |
| Solução estoque de sais | 5                   | -                                     |
| Ureia                   | 25                  | -                                     |
| Bicarbonato de sódio    | 200                 | -                                     |

Fonte: Autora (2018).

Os ensaios de ozonização convencional e catalítica heterogênea foram realizados em pH real de efluente sintético produzido e em pH básico. A alcalinização foi realizada por meio da adição de hidróxido de sódio (NaOH) até atingir o pH desejado ( $\text{pH} \geq 9$ ).

O catalisador adotado foi o carvão ativado em pó devido ao seu bom desempenho como iniciador da reação de decomposição do ozônio (RODRIGUÉZ et al., 2008), além de seu grande poder de adsorção. A concentração de catalisador utilizado foi de 2 g/L de efluente sintético, que de acordo com Pinheiro (2014), nessa concentração, a decomposição do ozônio em radical hidroxila em pH maiores que 6 apresenta maior velocidade de reação.

As configurações para cada ensaio realizado foram as mesmas tanto para a ozonização convencional quanto para a catalítica. Sendo os testes realizados nas vazões de ozônio de 60, 120, 180, 240 e 300 L/h nos tempos de contato de 5, 10, 20, 40 e 60 minutos, avaliando também a condição inicial do efluente (tempo de contato 0). Importante mencionar que, devido às características físicas do carvão ativado que confere cor aparente e turbidez ao efluente, o tempo de contato zero foi analisado anteriormente a adição do catalisador (tempo 0\*) e após a adição (tempo 0), sendo que todas as amostras contendo carvão ativado, após o processo de ozonização, passaram por filtração com o intuito de remover o catalisador para que não houvesse interferências nas análises.

Os parâmetros monitorados foram cor, turbidez, pH, DQO e amônia. O Quadro 2 apresenta os parâmetros, o método de análise e o equipamento utilizado na análise de cada amostra, as quais foram coletadas de acordo com os tempos de contato estabelecidos na quantidade de 200 mL e as análises foram realizadas em triplicatas.

Quadro 2 – Metodologia e equipamento utilizado na análise de cada parâmetro

| Parâmetro | Unidade              | Método de análise                                    | Equipamento                                    | Precisão     |
|-----------|----------------------|--|--|--------------|
| Cor       | mg Pt-Co/L           | Espectrofotométrico 2120C (Apha, 2005)               | Espectrofotômetro UV-VIS                       | $\pm 0,1\%$  |
| Turbidez  | UNT                  | Nefelométrico 2130 B (Apha, 2005)                    | Turbidímetro digital                           | $\pm 2\%$    |
| pH        | -                    | Potenciométrico 4500-H <sup>+</sup> (Apha, 2005)     | Phmetro digital microprocessado                | $\pm 0,01\%$ |
| DQO       | mg O <sub>2</sub> /L | Colorimétrico por refluxo fechado 5220D (Apha, 2005) | Bloco digestor de DQO Espectrofotômetro UV-VIS | $\pm 20\%$   |
| Amônia    | mg N/L               | Colorimétrico 4500-NH <sub>3</sub> C (Apha, 1992)    | Espectrofotômetro UV-VIS                       | $\pm 0,1\%$  |

Fonte: Autora (2018).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

De forma geral, os resultados dos experimentos apresentaram comportamento semelhante em todos os ensaios, onde observa-se o aumento das remoções dos parâmetros analisados conforme ocorre o aumento da vazão e do tempo de contato. Sendo assim, este material traz apenas os resultados da configuração de melhor desempenho para casa ensaio realizado, ou seja, na vazão de ozônio de 300 L/h e tempo de contato de 60 min.

Conforme mencionado anteriormente, o efluente sintético foi preparado no dia da realização do ensaio, com a finalidade de reduzir alterações das características físico-químicas do efluente. No entanto, alguns fatores podem interferir nestas características, como a temperatura e imprecisão durante a pesagem dos reagentes. O Quadro 3 apresenta os valores médios obtidos a partir das análises das triplicatas das amostras bruta de cada ensaio realizado, considerando todas as vazões propostas.

Quadro 3 – Valores médios das características físico-químicas do efluente sintético bruto.

| Parâmetros       | Ozonização Convencional |               |              |               | Ozonização Catalítica Heterogênea |               |              |               |
|------------------|-------------------------|---------------|--------------|---------------|-----------------------------------|---------------|--------------|---------------|
|                  | pH real                 | Desvio Padrão | pH corrigido | Desvio Padrão | pH real                           | Desvio Padrão | pH corrigido | Desvio Padrão |
| pH               | 8,00                    | 0,03          | 10,63        | 0,08          | 7,95                              | 0,85          | 11,88        | 0,18          |
| Cor (mg Pt-Co/L) | 8,43                    | 1,01          | 12,47        | 1,48          | 8,07                              | 0,55          | 7,47         | 1,07          |
| Turbidez (UNT)   | 2,93                    | 0,37          | 3,21         | 0,57          | 2,90                              | 0,40          | 6,98         | 6,45          |
| DQO (mg/L)       | 333,61                  | 13,81         | 333,28       | 9,30          | 329,67                            | 7,12          | 313,27       | 12,39         |
| Amônia (mg/L)    | 4,50                    | 3,84          | 2,39         | 0,65          | 2,45                              | 1,31          | 5,80         | 3,16          |

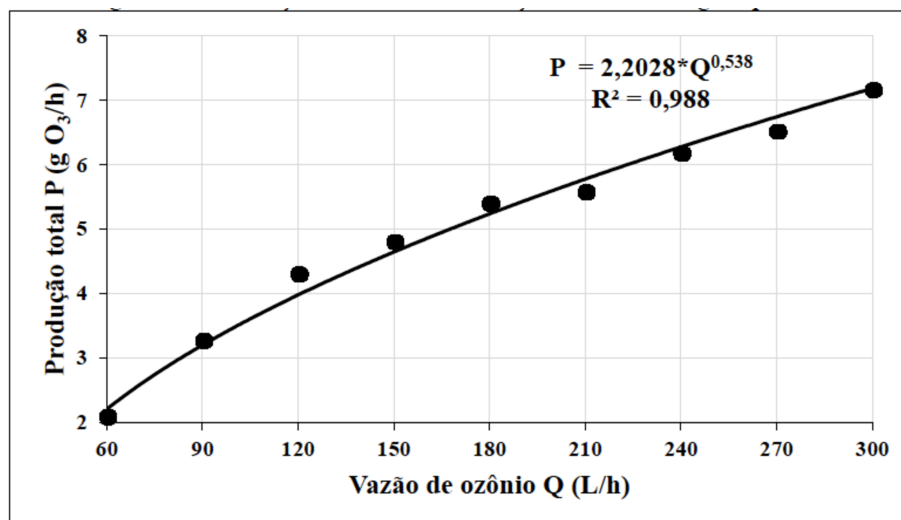
Fonte: Autora (2018).

Importante mencionar que o valor médio do pH foi calculado considerando o valor médio da concentração de  $H^+$  obtida em cada ensaio.

#### 3.1. Produção e consumo de ozônio

A partir da calibração do ozonizador observou-se que, na maior diferença de potencial aplicada no equipamento, a produção de ozônio na vazão de 300 L/h foi de 7,15  $gO_3/h$ , conforme apresentado no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Produção de ozônio em função da vazão aplicada.



Fonte: Autora (2018).

A quantidade de ozônio que reagiu com o meio líquido foi determinada a partir da diferença entre a quantidade produzida pelo ozonizador e a quantidade de gás retido nos frascos lavadores de gás. Os frascos lavadores continham uma solução de iodeto de potássio (KI) a 2%, permitindo assim a quantificação do ozônio que não reagiu com o efluente por meio do método iodométrico (APHA,1992). O Quadro 4 apresenta o consumo de O<sub>3</sub> nos processos de ozonização para ambos os pH analisados, considerando que o pH real do efluente sintético é levemente alcalino (pH em torno de 7,97) e o pH corrigido ficou em torno de 10,9 de acordo com o pH desejado (pH ≥ 9).

Quadro 4 – Comparativo do consumo de O<sub>3</sub> nos ensaios realizados.

| Vazão (L/h)        | Gás produzido em g/h | Ozonização Convencional  |                               | Ozonização Catalítica Heterogênea |                               |
|--------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|                    |                      | Reagido em pH real (g/h) | Reagido em pH corrigido (g/h) | Reagido em pH real (g/h)          | Reagido em pH corrigido (g/h) |
| 300                | 7,15                 | 1,76                     | 3,87                          | 5,38                              | 4,13                          |
| <b>% de reação</b> |                      | <b>25%</b>               | <b>54%</b>                    | <b>75%</b>                        | <b>58%</b>                    |

Fonte: Autora (2018).

A partir do Quadro 4, percebe-se que uma pequena parcela do ozônio produzido reagiu com o efluente durante o processo de ozonização convencional em pH real, podendo indicar que a principal rota de decomposição do ozônio se deu de forma direta e seletiva aos compostos presentes no efluente, enquanto que, na presença do catalisador, também em pH real, a quantidade de ozônio que reagiu na massa líquida foi 3 vezes maior, indicando que a adição do catalisador promoveu a

decomposição indireta do ozônio, produzindo mais radicais hidroxila capazes de reagir não seletivamente com os compostos do efluente conforme descrito por Rodríguez et al (2008).

Na ozonização convencional, percebe-se que no pH corrigido houve maior reação do ozônio com o efluente, demonstrando que em pH superior a 9, a principal via de degradação do ozônio é a decomposição indireta ou radicalar.

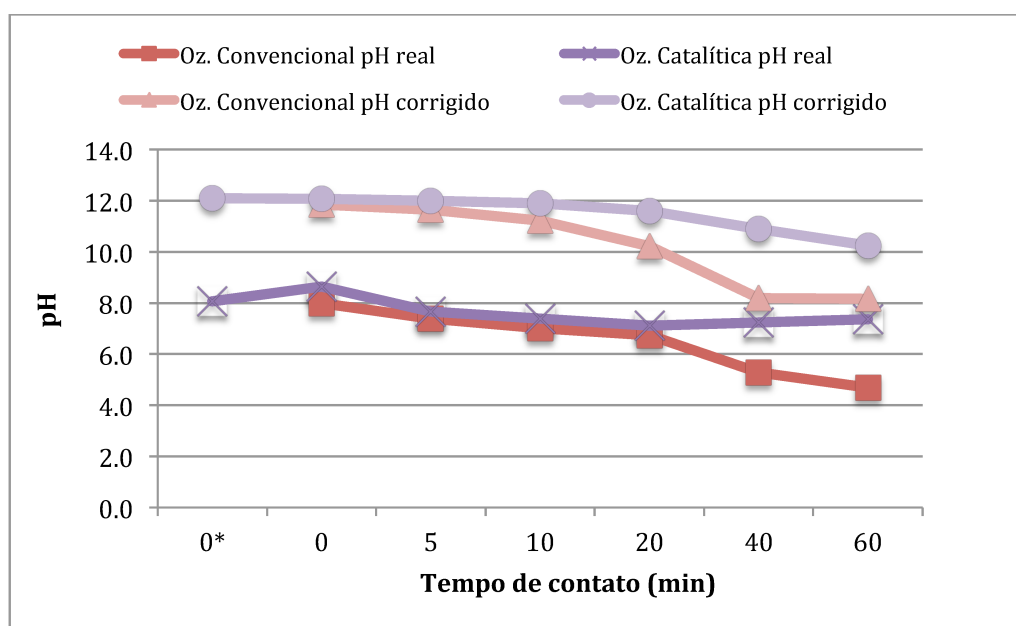
Já na ozonização catalítica heterogênea em pH real do efluente, nota-se que a adição do carvão ativado favoreceu a reação indireta. Rodríguez et al (2008) observaram que o carvão ativado é um eficiente iniciador da transformação do ozônio em radical hidroxila. No entanto, observou-se que em pH corrigido a quantidade de ozônio reagido com o efluente sintético foi menor, contrariando o esperado uma vez que foi estabelecido que o pH básico promove a reação indireta do ozônio assim como o carvão ativado. Esperava-se uma quantidade de ozônio reagido superior ao pH real do efluente levando a crer que a reação de decomposição do ozônio possa ter sido influenciada por outro componente desconhecido, sendo necessário a realização de mais ensaios e estudos mais aprofundados voltados à relação de interação entre o carvão ativado e a decomposição do ozônio no efluente sintético em pH corrigido.

### **3.2. Ozonização convencional e catalítica**

#### *3.2.1. pH*

O parâmetro pH apresentou comportamento semelhante em ambas as ozonizações, conforme demonstrado no Gráfico 2. Observou-se a redução do pH ao longo do tempo de contato em todos os ensaios, sendo que as maiores reduções ocorreram na ozonização convencional. Curti (2011) e Pinheiro (2014) também observaram reduções do pH durante os experimentos de ozonização. De acordo com as autoras, essa redução ocorre devido a formação de subprodutos de origem ácida durante a oxidação da matéria orgânica do efluente sintético por meio dos radicais hidroxilas.

Gráfico 2 – Redução do pH nos ensaios de ozonização convencional e catalítica na vazão de 300 L/h.



Fonte: Autora (2018).

### 3.2.2. Cor, turbidez e DQO

As porcentagens de remoção de cor, turbidez e DQO são apresentadas no Quadro 5. Importante mencionar que na porcentagem de remoção de cor e turbidez na ozonização catalítica, a mesma foi calculada considerando o tempo de contato 0 após a adição do catalisador, pois a adição do carvão ativado confere cor aparente e turbidez ao efluente. Em contrapartida, a remoção de DQO foi calculada em relação ao tempo de contato 0\*, anteriormente a adição do catalisador pois somente a adição do carvão ativado promove a redução da DQO devido as suas propriedades de adsorção. Por isso, essa adsorção da matéria orgânica pelo carvão ativado deve ser considerada como parte do processo de remoção de DQO e a porcentagem de remoção foi calculada levando em consideração a concentração de DQO anterior à adição do catalisador.

Quadro 5 – Porcentagem de remoção de cor, turbidez e DQO nos ensaios de ozonização realizados na vazão de 300 L/h e tempo de contato de 60 min.

|                                   | Ozonização Convencional |                |            |
|-----------------------------------|-------------------------|----------------|------------|
|                                   | Cor (mg Pt-Co/L)        | Turbidez (UNT) | DQO (mg/L) |
| pH real                           | 65%                     | 45%            | 53%        |
| pH corrigido                      | 80%                     | 51%            | 85%        |
| Ozonização Catalítica Heterogênea |                         |                |            |
| pH real                           | 65%                     | 62%            | 90%        |
| pH corrigido                      | 89%                     | 87%            | 95%        |

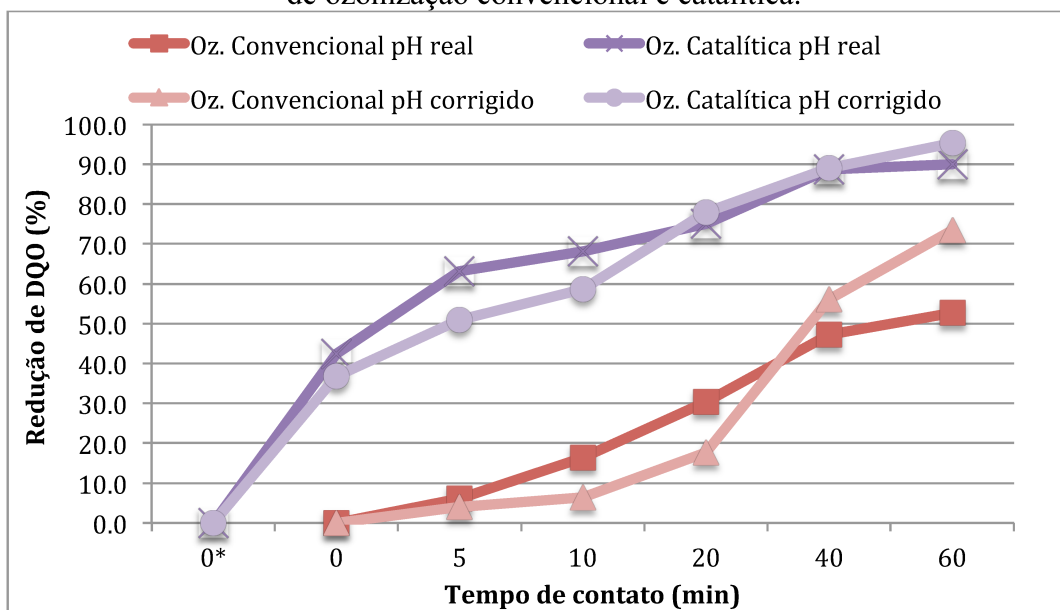
Fonte: Autora (2018).



Observa-se que os ensaios com pH corrigido obtiveram melhores porcentagens de remoção em relação aos ensaios de pH real. Conforme descrito na literatura por diversos autores (IKEHATA e LI, 2018; RODRIGUÉZ, 2008; PINHEIRO, 2014; CURTI, 2011), o meio básico favorece a decomposição do ozônio via reação indireta, liberando radicais hidroxilas que possuem grande potencial de oxidação ( $E^{\circ} = 2,80 \text{ V}$ ) possibilitando sua rápida interação com os componentes do efluente sintético, produzindo melhores resultados na remoção de cor, turbidez e matéria orgânica.

A melhor configuração para remoção de cor e turbidez ocorreu na ozonização catalítica em pH alcalino, sendo que os ensaios mostraram um comportamento muito semelhante dos parâmetros durante as ozonizações, em que as remoções aumentavam conforme aumentava-se a vazão analisada e o tempo de contato. Outro comportamento observado foi que a maior parte das remoções ocorreu nos primeiros minutos da ozonização. Esse comportamento pode ser explicado devido a abundância do componente no início do processo e a velocidade das reações de oxidação serem de ordem 1. O Gráfico 3 apresenta as reduções de DQO ao longo do tempo para as ozonizações realizadas.

Gráfico 3 – % de redução de DQO ao longo do tempo para a vazão de 300 L/h nos ensaios de ozonização convencional e catalítica.



Fonte: Autora (2018).

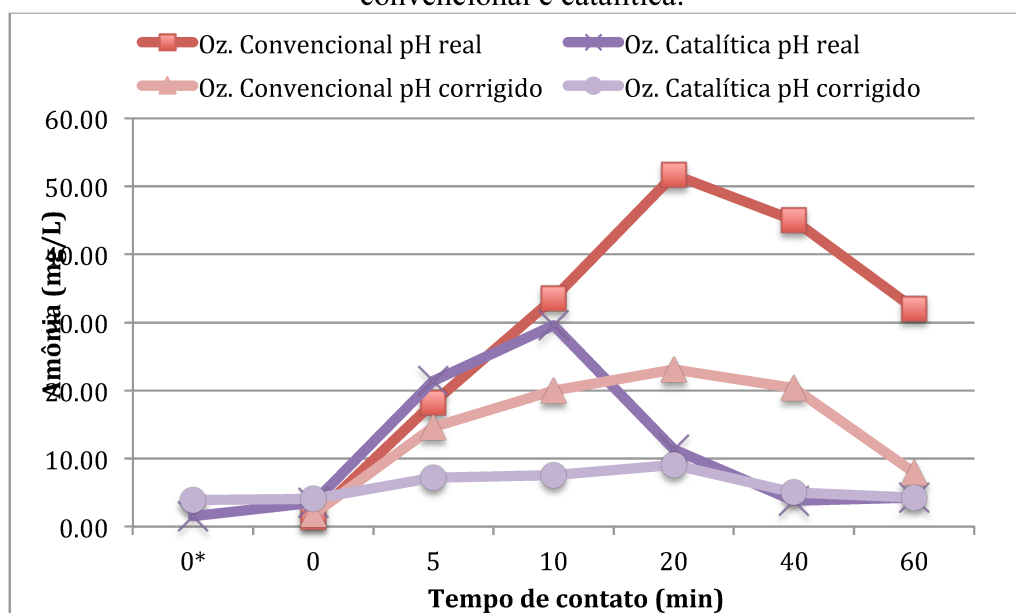
Conforme mencionado anteriormente, a adição do carvão ativado por si só foi capaz de promover a redução de DQO, conforme evidenciado no Gráfico 3. De acordo com Souza (2009), as propriedades de adsorção do carvão ativado provêm de sua estrutura e composição, onde sua alta superfície interna porosa permite a adsorção de moléculas de gás e soluto em sua estrutura.

Portanto, a combinação da ozonização catalisada pelo carvão ativado em meio alcalino se mostrou muito satisfatória na oxidação da matéria orgânica presente no efluente sintético, mesmo com a quantidade de ozônio reagido sendo inferior ao reagido em pH real, conforme apresentado no Quadro 4.

### 3.2.3. Amônia

De uma forma geral, o parâmetro amônia não apresentou um comportamento consistente nos estudos realizados, permitindo a identificação de um padrão de seu comportamento durante os processos de ozonização. No entanto, percebe-se que há um aumento na concentração de amônia e posterior redução ao longo do tempo de contato, sendo esse aumento identificado por vezes no início do processo de ozonização, ora no final do tempo de contato estudado. O Gráfico 4 apresenta a variação do parâmetro amônia ao longo do tempo de contato na vazão de 300 L/h.

Gráfico 4 – Concentração de amônia ao longo do tempo no processo de ozonização convencional e catalítica.



Fonte: Autora (2018).

A partir do Gráfico 4, percebe-se que a adição do carvão ativado ao efluente não provocou alterações significativas na concentração de amônia.

O efluente sintético bruto apresentou baixos valores de amônia comparado com a faixa de concentração presente no esgoto doméstico (20 a 40 mg/L) de acordo com Von Sperling (2014). Os resultados obtidos indicaram a formação de amônia ao longo do tempo e posterior decaimento. Sandu (2004) também observou a oxidação da amônia com o aumento do tempo, podendo indicar uma maior remoção de amônia em tempos de contato superior a 60 minutos.

Domenjout et al (2011) observou que ao longo da ozonização, a concentração de amônia diminuiu enquanto a concentração de nitrato aumentou, levando a crer que o mesmo possa ter ocorrido no presente estudo, porém, seria necessário a quantificação de nitrito e nitrato para a obtenção de conclusões mais assertivas em relação a oxidação da amônia. Outro fator que contribui para a necessidade de quantificação de nitrito e nitrato é que de acordo com Tchobanoglous et al (2014), o ozônio possui pouco efeito na amônia sendo que pode reagir em alto pH, o nitrito é oxidado pelo ozônio e o nitrato pode reduzir a efetividade do ozônio.

#### **4. CONCLUSÕES**

Pode-se concluir que a ozonização catalisada pelo carvão ativado obteve melhores resultados de remoção de cor, turbidez e matéria orgânica. O pH desempenha um papel crucial na ozonização devido a sua relação direta com o tipo de decomposição do ozônio. Além disso, independentemente do tipo de ozonização e do pH inicial do efluente, a ozonização resultou na redução do pH. Com relação à amônia, os ensaios realizados indicaram a redução do parâmetro ao longo do tempo, no entanto o presente trabalho não abordou a quantificação de nitrito e nitrato, impedindo a avaliação completa do seu comportamento durante os processos de ozonização.

Os estudos do ozônio reagido no meio líquido indicaram que a ozonização catalítica heterogênea consumiu mais ozônio na remoção dos parâmetros analisados do que a ozonização convencional. Apesar dos resultados apontarem maior reação do ozônio com o efluente sintético no pH não alterado, as melhores remoções de cor, turbidez e DQO ocorreram em pH corrigido, indicando que somente a oxidação do ozônio não foi o principal fator de remoção da matéria orgânica carbonácea do efluente sintético e que o carvão ativado desempenhou um importante papel na remoção dos parâmetros analisados. No entanto, é necessário mais estudos para entender o mecanismo de decomposição do ozônio em pH alcalino ( $\text{pH} \geq 9$ ) na presença do carvão ativado para o efluente sintético utilizado no presente trabalho.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

APHA, AWWA; WPCF. **Standards Methods For Examination Of Water And Wastewater** (2005). 21th ed. Amer. Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington, D. C. USA.

APHA, AWWA; WPCF. **Standards Methods For Examination Of Water And Wastewater** (1992). 18th ed. Amer. Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington, D. C. USA.

APHA, AWWA; WPCF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. (1998) 20th Edition, Amer. Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, Washington DC.

- CURTI, K. C. F. **Estudo comparativo da degradação do inseticida Endosulfan através de: ozônio, fotólise e ozonização fotolítica**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- DOMENJOUR, B. et al. (2011) Ozone-based processes applied to municipal secondary effluents. **Ozone: Science & Engineering**, 33, nº 3: 243-249.
- GLAZE, W.H.; KANG, J. - W. (1987) The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation. **Ozone: Science and Engineering**, 9: 335 – 352.
- GOTTSCHALK, C.; LIBRA, J. A.; SAUPE, A. **Ozonation of water and waste water: A practical guide to understanding ozone and its applications**. 2. ed John Wiley & Sons, 2009.
- IKEHATA, K. and LI, Y. **Ozone-Based Processes**. In *Advanced Oxidation Processes for Waste Water Treatment*, pp. 115-134. 2018.
- MASTERS, G. M.; ELA, W. P.. **Introduction to environmental engineering and science**. 3. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2008.
- OLIVEIRA, A. L. **Influência do tipo de matéria orgânica no processo de desnitrificação em reatores sequenciais em batelada**. 2001. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- PINHO, E. A. S. et al. (2017) Tratamento de esgoto sanitário contendo micropoluentes no Brasil: revisão. **Bioenergia em Revista: Diálogos**, 7, nº 2.
- PINHEIRO, A. M. **Pós-tratamento de efluente saneante domissanitário por ozonização convencional e catalítica**. 2014. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- RODRIGUÉZ, A. et al. **Ozone-based technologies in water and wastewater treatment**. In *Emerging Contaminants from Industrial and Municipal Waste*, pp. 127-175. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008.
- SANDU, S. I. **Evaluation of ozone treatment, pilot-scale wastewater treatment plant, and nitrogen budget for Blue Ridge Aquaculture**. 2004. Tese de Doutorado. Virginia Tech.
- SOARES, L. V. **Ozonização de esgoto sanitário: estudo da hidrodinâmica, transferência de massa e inativação de microrganismos indicadores**. 2007. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- SOUZA, F. B. **Remoção de compostos fenólicos de efluentes petroquímicos com tratamentos sequenciais e simultâneos de ozonização e adsorção**. 2009. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- TORRES, P. **Desempenho de um reator anaeróbico de manta de lodo (UASB) de bancada no tratamento de substrato sintético simulando esgotos sanitários**. 1992. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.
- TCHOBANOGLIOUS, G. et al. **Wastewater engineering: treatment and resource recovery**. 5a ed. McGraw-Hill Education, New York, 2014.
- VON SPERLING, M. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Efluentes**. 4. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Editora UFMG, 2014. 472 p. v.1.