

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
ENGENHARIA AMBIENTAL

RAFAEL GASPAR DAMIANO

**Remoção de matéria carbonácea e nitrogenada de esgoto sanitário em
reator de leito estruturado com biomassa imobilizada**

São Carlos – SP
2014

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
ENGENHARIA AMBIENTAL

REMOÇÃO DE MATÉRIA CARBONÁCEA E NITROGENADA DE
ESGOTO SANITÁRIO EM REATOR DE LEITO ESTRUTURADO COM
BIOMASSA IMOBILIZADA

Aluno: Rafael Gaspar Damiano
Orientadora: Profa. Dra. Márcia H. R. Zamariolli Damianovic

Monografia apresentada ao curso de
graduação em Engenharia
Ambiental da Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de
São Paulo.

São Carlos – SP
2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

D158r Damiano, Rafael Gaspar
Remoção de matéria carbonácea e nitrogenada de
esgoto sanitário em reator de leito estruturado com
biomassa imobilizada / Rafael Gaspar Damiano;
orientadora Márcia Helena Rissato Zamariolli
Damianovic. São Carlos, 2014.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2014.

1. Leito estruturado. 2. Remoção de DQO. 3. Remoção
de nitrogênio. 4. Aeração intermitente. 5. Espuma de
poliuretano. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Rafael Gaspar Damiano**

Data da Defesa: 21/10/2014

Comissão Julgadora:

Resultado:

Márcia Helena Rissato Zamariolli Damianovic (Orientador(a))

Aprovado

Dagoberto Yukio Okada

APROVADO

Eugenio Foresti

APROVADO



Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

Aos meus pais, por mostrarem o caminho.

AGRADECIMENTOS

À Prof. ^a Márcia Helena Rissato Zamariolli Damianovic, pela orientação, atenção e disponibilidade em todos os momentos em que foi preciso.

Aos meus amigos e amigas da ambiental 2010, por fazerem especial toda a trajetória da graduação.

Ao Thadeu Salin Sahão, pelo companheirismo e amizade nos momentos fáceis e difíceis.

Ao Rafael Brito de Moura, pelos ensinamentos teóricos e práticos, e por ter me apresentado o reator.

Ao Dagoberto Yukio Okada e demais pesquisadores da *casinha*, por sempre oferecerem ajuda e amizade.

Aos funcionários e pesquisadores do LPB, que contribuíram para que o trabalho fosse feito.

À Universidade de São Paulo, por tornar tudo isso possível.

“As oportunidades multiplicam-se à medida que são agarradas”

Sun Tzu

RESUMO

DAMIANO, R. G. (2014) **Remoção de matéria carbonácea e nitrogenada de esgoto sanitário em reator de leito estruturado com biomassa imobilizada**. 50 pag. Trabalho de Graduação – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014.

Este trabalho teve como objetivo avaliar a remoção biológica de matéria carbonácea e nitrogenada do esgoto sanitário, utilizando-se um reator de leito estruturado com biomassa imobilizada. O reator utilizado possuía alimentação contínua, recirculação do efluente, um TDH entre 12,5 horas e 16,2 horas, e volume total de 11,6 L. Além disso, manteve-se ciclos de aeração, com 2 horas aerando e 1 hora sem aerar. Espumas cilíndricas de poliuretano fixadas em hastes verticais foram utilizadas como meio suporte, e sua remoção gradual levou a alterações na porosidade, variando-a de 50%, 53,8%, 57,9%, 61,5% e 65,4%. O período experimental foi dividido em duas etapas: Etapa 1 em que a porosidade foi mantida em 50%; Etapa 2, em que a porosidade foi aumentada com a retirada de material suporte. A Etapa 1 foi dividida em Fase de adaptação à nitrificação e refinamento operacional e Fase estável. A remoção de DQO na Fase estável foi de $89,89 \pm 3,35$ %, já a eficiência de remoção de nitrogênio foi de $73,83 \pm 7,58$ %, sendo este último valor consideravelmente maior do que o obtido na fase de adaptação, devido a um aumento de eficiência do mecanismo de desnitrificação. Já a Etapa 2 caracterizou-se por pequena variação média da eficiência de remoção de DQO, com $89,04 \pm 2,32$ % de eficiência para as porosidades estudadas, sendo este valor estatisticamente igual ao obtido na Etapa 1. Com relação aos processos de remoção de N-total, constatou-se um acúmulo de nitratos ao se adotar porosidade de 53,8%, e posterior decréscimo ao longo do tempo, evidenciando a readaptação das bactérias desnitrificantes às cargas específicas nas hastes remanescentes. As eficiências de remoção de nitrogênio para os períodos de remoção das hastes foram de 79,21%, 50,55%, 49,27%, 67,78% para as porosidades de 53,8%, 57,9%, 61,5% e 65,4%, respectivamente.

Palavras-chave: Leito estruturado. Remoção de DQO. Remoção de nitrogênio. Aeração intermitente. Espuma de poliuretano

ABSTRACT

DAMIANO, R. G. (2014) **Carbon and nitrogen removal from wastewater using a reactor with structured bed and immobilized biomass**. 50 pag. Trabalho de Graduação – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014.

The objective of this work were to evaluate the removal of carbon and nitrogen matters from wastewater, using a structured bed reactor with immobilized biomass. The reactor used was continuously fed, had effluent recirculation, an initial HDT between 12.5 hours and 16,2 hours, and total volume of 11,6 L. Furthermore, aeration cycles were used, with 2 hours of aeration and 1 hour of non-aeration. Cylindric polyurethane foams supported by vertical sticks were used for biomass attachment, and its gradual removal brought changes in porosity, ranging it from 50%, to 53,8%, 57,9%, 61,5% and 65,4%. The experimental period were divided into two stages: Stage 1 which the porosity were 50%; Stage 2, with an increasing in porosity by removing the polyurethane foams. The 50% of porosity stage were divided into the Adaptation Phase and Stable Phase. The COD removal in the Stable Phase was $89,89 \pm 3,35$ %, and Total-N removal were $73,83 \pm 7,58$ %, the latter being significantly higher than the value obtained in the adaptation phase, due to an increase of the denitrification efficiency. The Increasing Porosity Stage was characterized by little variation of COD removal efficiency, with $89,04 \pm 2,32$ % of removal for 53,8% of porosity, 90,30% for 57,9%, 87,23% for 61,5% and 89,92% for 65,4%. It was found an accumulation of nitrate by adopting porosity of 53.8%, and a subsequent decrease over the time, showing a rehabilitation of the denitrification bacteria into the remaining sticks. The N-Total removal of the Increasing Porosity Stage were 79,21%, 50,55%, 49,27%, 67,78% for the porosities of 53,8%, 57,9%, 61,5% e 65,4%, respectively.

Keywords: structured bed, COD removal, nitrogen removal, intermittent aeration, polyurethane foam.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 3.1 - Nitrificação e Desnitrificação..... | 19 |
| Figura 3.2 - Condições do meio, fonte de energia e fonte de carbono que caracterizam os processos de nitrificação e desnitrificação | 21 |
| Figura 3.3 - Subdivisões e transformações da matéria nitrogenada (Adaptado de SPERLING, 1996) | 24 |
| Figura 4.1 - Esquema do reator microaerado. A1: entrada do afluente; A2: entrada da recirculação; A3: saída do efluente; A4: saída para recirculação..... | 25 |
| Figura 4.2 - Bombas dosadoras responsáveis pela alimentação e recirculação do reator..... | 26 |
| Figura 4.3 - Sistema de manutenção da temperatura no reator | 27 |
| Figura 4.4 - Válvula para controle da aeração..... | 28 |
| Figura 4.5 - Alteração da configuração da pedra porosa no reator. Configuração A: adotada inicialmente, com apenas uma pedra porosa para difusão (em vermelho); Configuração B: Adotada de forma definitiva, com duas pedras porosas para difusão da mesma vazão de ar. . | 28 |
| Figura 5.1 - Concentração de NTK do afluente, efluente e eficiência de oxidação de NTK para o reator operando com porosidade de 50% | 32 |
| Figura 5.2 - Eficiência de conversão de óxidos de nitrogênio para N-N ₂ via processo de desnitrificação para o reator operando com porosidade de 50%..... | 32 |
| Figura 5.3 - Concentração de N-Total no afluente, efluente e eficiência de remoção de N-Total para o reator operando com porosidade de 50%..... | 33 |
| Figura 5.4 - Concentrações de N-NO ₂ no afluente e efluente para o reator operando com porosidade de 50% | 35 |
| Figura 5.5 - Concentrações de N-NO ₃ no afluente e efluente para o reator operando com porosidade de 50% | 35 |
| Figura 5.6 - Concentração de DQO do afluente e efluente e eficiência de remoção de DQO em reator operando com porosidade de 50% | 36 |
| Figura 5.7 - pH do afluente e efluente em reator operando com porosidade de 50% | 38 |
| Figura 5.8 - Valores de alcalinidade total no afluente e efluente em reator operando com porosidade de 50% - Etapa 1 | 38 |
| Figura 5.9 - Concentração de DQO do afluente e efluente e eficiência de remoção de DQO em reator com porosidade variável – Etapa 2..... | 40 |
| Figura 5.10 - Concentração de N-nitrato para o reator operando com porosidade variável | 41 |
| Figura 5.11 - Concentração de N-nitrito para o reator operando com porosidade variável..... | 41 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.12 - Concentração de N-Amoniacal do efluente no período em que o reator operou com porosidade variável | 42 |
| Figura 5.13 - N-amoniaco, N-nitrito e N-nitrato do efluente, e NTK médio do afluente. | 42 |
| Figura 5.14 - Eficiência de remoção de nitrogênio durante o período de alteração da porosidade. | 43 |
| Figura 5.15 - pH do afluente e efluente com reator operando com porosidade variada. | 45 |
| Figura 5.16 - Alcalinidade do afluente e efluente com reator operando com porosidade variada. | 45 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 4.1–Características do esgoto sanitário | 29 |
| Tabela 4.2 - Análises físico-químicas que serão realizadas na pesquisa | 30 |
| Tabela 5.1 - Concentração de NTK do afluente, efluente e eficiência de oxidação de NTK para o reator operando com porosidade de 50% - Etapa 1 | 33 |
| Tabela 5.2 - Eficiência de conversão de óxidos de nitrogênio para N-N ₂ via desnitrificação para o reator operando com porosidade de 50%. | 34 |
| Tabela 5.3 - Concentração de N-Total no afluente, efluente e eficiência de remoção de N-Total para o reator operando com porosidade de 50% - Etapa 1..... | 34 |
| Tabela 5.4 - Concentrações médias de N-nitrito e N-nitrato no afluente e efluente para o reator operando com porosidade de 50% | 36 |
| Tabela 5.5 - Concentrações médias de DQO do afluente e efluente e eficiência de remoção de DQO em reator operando com porosidade de 50% | 37 |
| Tabela 5.6 - Valores médios de alcalinidade para o afluente e efluente em reator operando com porosidade de 50% | 38 |
| Tabela 5.7 - Concentrações médias de DQO do afluente e efluente e eficiência de remoção de DQO em reator com porosidade variável..... | 40 |
| Tabela 5.8- Valores médios de N-amoniacoal, N-nitrito e N-nitrato do efluente, e média histórica de NTK do afluente..... | 43 |
| Tabela 5.9 -Valores de eficiência de remoção de nitrogênio durante o período de alteração da porosidade. | 44 |
| Tabela 5.10 – Valores de alcalinidade do afluente e efluente com reator operando com porosidade variada | 46 |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | INTRODUÇÃO | 16 |
| 2. | OBJETIVOS | 17 |
| 3. | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 18 |
| 3.1 | Nitrificação e Desnitrificação | 18 |
| 3.2 | Remoção de nitrogênio em reator operando sob aeração intermitente..... | 21 |
| 3.3 | Meio Suporte | 22 |
| 3.4 | Tratamentos utilizando-se como afluente o esgoto sanitário | 23 |
| 4 | MATERIAIS E MÉTODOS..... | 25 |
| 4.1 | Reator..... | 25 |
| 4.2 | Inóculo | 29 |
| 4.3 | Esgoto Sanitário..... | 29 |
| 4.4 | Análises Físico-Químicas | 30 |
| 4.5 | Procedimento Experimental | 30 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 31 |
| 5.1 | Etapa 1: Porosidade do leito de 50% | 31 |
| 5.1.1 | Remoção de nitrogênio – Etapa 1..... | 31 |
| 5.1.2 | Remoção de DQO – Etapa 1 | 36 |
| 5.1.3 | pH e Alcalinidade | 37 |
| 5.2 | Etapa do aumento da porosidade – Etapa 2 | 39 |
| 5.2.1 | Remoção de DQO – Etapa 2 | 39 |
| 5.2.2 | Remoção de nitrogênio – Etapa 2..... | 40 |
| 5.2.3 | pH e Alcalinidade – Etapa 2..... | 44 |
| 6 | CONCLUSÕES | 47 |
| 7 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 48 |

1. INTRODUÇÃO

O lançamento de efluentes com altas concentrações de nutrientes nos corpos d'água favorece o desequilíbrio de ecossistemas por meio de processos de eutrofização nos rios, causando grandes prejuízos à saúde humana e ao meio ambiente. Como alternativa para a prevenção e reversão deste quadro, existem os sistemas de tratamento convencionais, que promovem boa remoção de matéria orgânica, porém baixa eficiência de remoção de nutrientes específicos, como o nitrogênio.

Nas últimas décadas, observaram-se grandes avanços na área de tratamento de águas residuárias, com o surgimento de diversos sistemas voltados para este fim. Entre estes cabe ressaltar os sistemas voltados para a remoção biológica de nitrogênio, que compõem o sistema de tratamento terciário de diversas estações de tratamento de esgotos. Porém, sua remoção biológica envolve estágios distintos, criando a necessidade de manter reatores operando sob ambientes distintos.

Alternativas tradicionais para a remoção deste nutriente requerem um tanque operando sob ambiente aeróbio e um segundo tanque sob ambiente anóxico para a manutenção da desnitrificação, traduzindo-se em grandes custos ao tratamento final.

O LPB (Laboratório de Processos Biológicos) da Escola de Engenharia de São Carlos – USP vem desenvolvendo sistemas de remoção biológica de nitrogênio, utilizando-se reatores compactos, que visam a manutenção de processos de nitrificação e desnitrificação em uma única unidade.

Diversos parâmetros construtivos relacionados ao reator influenciam diretamente na eficiência de remoção de nitrogênio. Um destes parâmetros, e de grande importância, é a porosidade do leito, pois se relaciona com o volume útil do reator. A busca pela maximização de seu volume útil possibilita o tratamento de maiores vazões sem alterações do volume total do reator.

2. OBJETIVOS

- Avaliar a remoção biológica de nitrogênio e de matéria orgânica em um reator de leito estruturado, com biomassa imobilizada e alimentação contínua.
- Avaliar o impacto na remoção de nitrogênio e de matéria orgânica ao se variar o volume útil do reator com o aumento de sua porosidade.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Nitrificação e Desnitrificação

Apesar da histórica dependência de água da sociedade, relacionada a fins de sobrevivência e desenvolvimentos social e econômico, observa-se uma constante deterioração de sua qualidade associado ao lançamento de efluentes contendo altas concentrações de nutrientes. Lançamentos com estas características podem causar danos à saúde humana e ao meio ambiente. No aspecto ambiental, tem-se a eutrofização de águas, cuja característica é o desenvolvimento excessivo de macrófitas aquáticas e fitoplâncton, que por sua vez causam alterações mais profundas neste ecossistema, como mudanças de pH, produção de toxinas associadas a floração de cianobactérias, entre outros (EPA, 1993; CALIJURI et al., 2006). Com relação à saúde humana, óxidos de nitrogênio característicos de efluentes domésticos podem levar a indução à metemoglobinemia e formação potencial de substâncias carcinogênicas (nitrosamidas e nitrosaminas) (BOUCHARD et al., 1992).

A fim de minimizar estes danos, grande quantidade de recursos tem sido investidos com o propósito de se desenvolver sistemas de tratamento de águas residuárias, levando a amplos avanços nas últimas duas décadas.

Entre estes avanços, enquadram-se os sistemas de lodos ativados convencionais e reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB), amplamente utilizados no Brasil. Apesar de estes sistemas apresentarem bom desempenho de remoção de matéria orgânica, não promovem a remoção de nutrientes específicos como o nitrogênio. Assim, há necessidade de sistemas de pós-tratamento operando para este fim.

A remoção de nitrogênio em sistemas de tratamento biológico ocorre por meio de processos de nitrificação e desnitrificação. Na nitrificação há oxidação da amônia ou íon amônia para nitrito e subsequente oxidação de nitrito para nitrato, em condições aeróbias. Durante a desnitrificação, nitrato é convertido a gás nitrogênio, com óxido nítrico e óxido nitroso (NO e N₂O respectivamente) agindo como possíveis intermediários, em um ambiente anóxico. Pode-se alcançar as fases deste ciclo, variando-se as fases aeróbia, anaeróbia e anóxica temporal ou espacialmente (Figura 3.1). (IAMAMOTO, 2006)

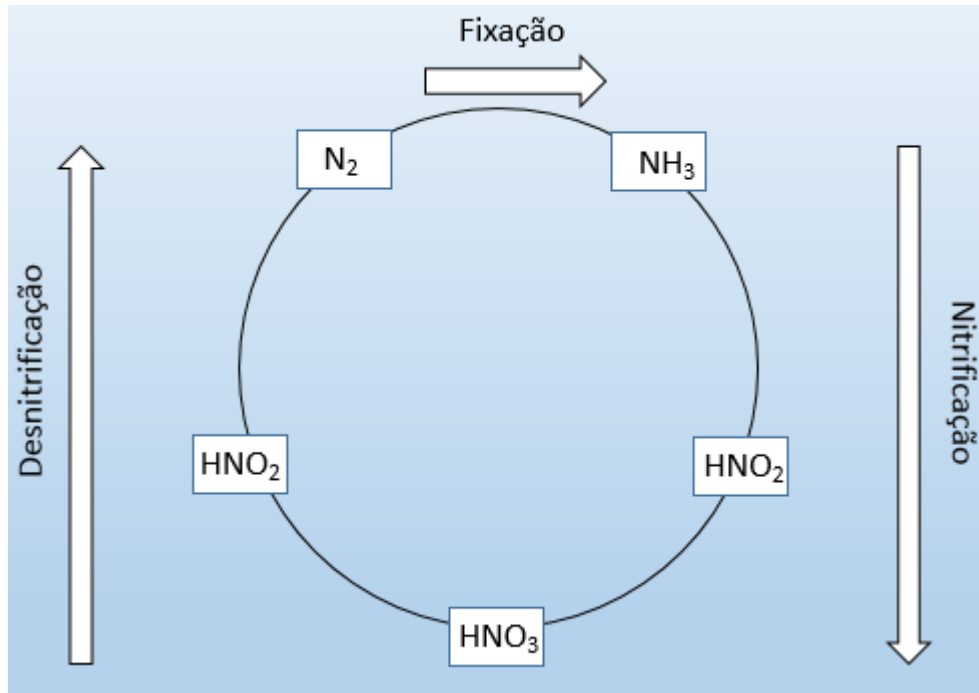


Figura 3.1 - Nitrificação e Desnitrificação

O processo de nitrificação é realizado por dois grupos de bactérias. No primeiro grupo se encaixam as bactérias responsáveis pelo estágio de nitritação, sendo que neste o principal gênero conhecido é o *Nitrosomonas*. Tem-se conhecimento, também, dos gêneros *Nitrosococcus*, *Nitrosospira*, *Nitrosolobus* e *Nitrosovibrio*. Já no segundo grupo se encaixam as bactérias responsáveis pela fase da nitratação, em que o gênero de maior destaque é o *Nitrobacter* (RITTMANN & MCCARTY, 2001).

Estes dois grupos de bactérias quimioautotróficos tem seu metabolismo sustentado pela energia proveniente da oxidação de compostos inorgânicos e fonte de carbono proveniente do dióxido de carbono. Como o aceptor final de elétrons é o oxigênio, a nitrificação como um todo acontece em meio estritamente aeróbio. A alcalinidade do meio serve como importante fator para a manutenção da nitrificação, pois ajuda a manter o pH e serve como fonte de carbono para os microrganismos quimioautótrofos, através do bicarbonato. A nitrificação pode ser representada por meio das seguintes equações químicas:

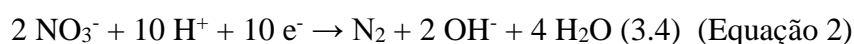
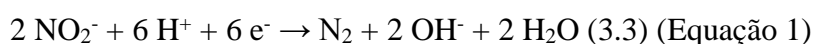


Por meio da análise das equações 1 e 2, conclui-se que a demanda total teórica de oxigênio requerida para a nitrificação é de 4,57 mg de O₂ por mg de NH₄⁺, sendo que a

nitritação consome 3,43 mg de O₂ por 1mg de NH₄⁺ e a nitratação consome 1,14 mg de O₂ por 1 mg de NO₂⁻ (SHARMA & AHLERT, 1977; METCALF & EDDY, 2003).

A segunda etapa do processo de remoção de nitrogênio se caracteriza pela desnitrificação. Nesta, os óxidos de nitrogênio são reduzidos a nitrogênio gasoso por microrganismos heterótrofos em meio anóxico, assim há a utilização de nitrito e nitrato como aceptor final de elétrons, em um metabolismo com fonte de carbonos e energia provenientes da degradação da matéria orgânica. Os microrganismos responsáveis pela retirada de nitrogênio por meio da desnitrificação pertencem principalmente ao filo das *Proteobacteria*, tais como *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Paracoccus* e *Thiobacillus* (RITTMANN E MCCARTY, 2001).

Como no processo de nitrificação, a desnitrificação pode ser representada estequiometricamente por meio de duas reações (equações 1 e 2):



Para análise quantitativa do nitrogênio presente no meio aquoso, utiliza-se, frequentemente, o parâmetro nitrogênio total (N-Total), que representa a soma do nitrogênio total Kjeldahl (NTK; combinação da amônia e nitrogênio orgânico) com as frações de nitrogênio presentes nas formas de óxidos (nitritos e nitratos).

Outro parâmetro de grande importância para os processos de nitrificação e desnitrificação é a alcalinidade. Na nitrificação o bicarbonato serve como fonte de carbono para os microrganismos quimioautotróficos, e ajuda a manter estável o pH do meio. Neste processo, há consumo de 7,14 mgCaCO₃ por mg de NH₄⁺ oxidado. (METCALF & EDDY, 2003)

O processo de desnitrificação produz 3,57 mgCaCO₃ para cada mg de NO₃⁻ reduzido a N₂ gasoso. Portanto, há uma recuperação de 50% da alcalinidade consumida no processo de nitrificação. (EPA, 1993).

A Figura 3.2 seguir ilustra as condições do meio, fonte de energia e fonte de carbono que caracterizam os processos de nitrificação e desnitrificação heterotrófica.

| | Condição | Fonte de energia | Fonte de C |
|-----------------|--|-------------------|------------------|
| Nitrificação | Aeróbio (O_2 é acceptor final de elétrons) | NH_3 e NO_2^- | CO_2 |
| Desnitrificação | Anóxico (NO_3^- e NO_2^- são aceptores finais de elétron) | Matéria orgânica | Matéria orgânica |

Figura 3.2 - Condições do meio, fonte de energia e fonte de carbono que caracterizam os processos de nitrificação e desnitrificação

3.2 Remoção de nitrogênio em reator operando sob aeração intermitente

Assim, como a nitrificação e a desnitrificação são processos com exigências metabólicas distintas, tradicionalmente, utilizam-se reatores compostos por unidades diferentes, voltadas a manutenção destes diferentes processos. A manutenção destas unidades diferentes somada à separação da unidade responsável pela remoção da matéria orgânica se traduzem em elevados custos de construção, operação e manutenção dos sistemas.

Estudos recentes demonstram a viabilidade do processo de remoção de nitrogênio em um único reator, ou seja, processos de nitrificação e desnitrificação ocorrendo de forma simultânea e efetiva (MUNCHEL al., 1996; POCHANA & KELLER, 1999; ZHANG E ZHOU, 2007; ZHU et al., 2007; DO CANTO et al., 2008; MOURA et al., 2012)

Sistemas de remoção de nitrogênio convencionais contínuos requerem um segundo tanque operando sob condição anóxica, de forma a possibilitar o processo de desnitrificação. A combinação de tal tanque para a manutenção da remoção de nitrogênio é usualmente complexa e se traduz em maiores custos de implementação e manutenção do sistema, além maior demanda de oxigênio, quando comparados aos sistemas operando sob NDS. Dessa forma, tem-se diversas vantagens de sistemas operando sob processos NDS frente aos convencionais (MUNCH et al., 1996; DO CANTO et al., 2008).

MOURA et al. (2012) estudaram a manutenção de processos de nitrificação e desnitrificação, em um reator aerado intermitentemente, de modo a se ter a fase aeróbia e anóxica separadas ao longo do tempo. Para tanto, ajustaram-se períodos de atividade do aerador, programado com o objetivo de se obter a máxima eficiência de remoção de nitrogênio no sistema. Dessa maneira, a oxidação do nitrogênio amoniacal da água residuária em nitrato e nitrito foi realizada em períodos em que o reator foi mantido sob aeração. Já em período de não aeração, estabeleceu-se um ambiente anóxico visando o favorecimento do processo de desnitrificação.

Sistemas aerados intermitentemente apresentam uma série de vantagens em relação aos sistemas convencionais de lodos ativados. Entre estas vantagens, destacam-se economia operacional (há menor produção de lodo) e de energia decorrentes da maior eficiência de remoção de nitrogênio, uma vez que parte da matéria presente na água residuária é oxidada pela sua atuação como doador de elétrons para desnitrificação, reduzindo a necessidade de OD (CHEN et al 2000). Já ao se comparar com sistemas operados sob aeração contínua, Zhao et al. (1999) concluiu que sistemas operados a baixos valores de OD e aeração intermitente apresentam também maior eficiência de remoção de nitrogênio.

Visando minimizar os custos relacionados aos sistemas convencionais de efluentes, o Laboratório de Processos Biológicos (LPB) da Escola de Engenharia de São Carlos – USP vem desenvolvendo sistemas compactos, que integram os processos distintos de remoção de nitrogênio e matéria orgânica em uma mesma unidade. Uma das alternativas estudadas são os reatores de leito estruturado, com distribuição regular do meio suporte com biomassa imobilizada no reator, de forma a evitar a colmatação do meio que desestabiliza a hidrodinâmica do sistema.

Estudos com esgoto sanitário real estão sendo realizados como parte do doutorado de Rafael Brito Moura. Um dos aspectos que merecem atenção, de acordo com observado por Moura et al. (2012), é a busca pela maximização do volume útil do reator, possibilitando o tratamento de maiores vazões de esgoto por volume de reator.

3.3 Meio Suporte

Sistemas com biomassa imobilizada favorecem a remoção de nitrogênio do sistema, ao se comparar com sistemas operando com biomassa suspensa. Tais reatores apresentam alto

tempo de retenção celular, apesar de baixos valores de TDH, além do aumento da atividade microbiana e redução da geração de lodo. Tal fato decorre do favorecimento da fixação de bactérias nitrificantes, de crescimento lento, no meio suporte, aumentando a eficiência dos processos interconectados de nitrificação e desnitrificação (WIJFFELS & TRAMPER, 1995; ROSTRON et al., 2001).

O biofilme possibilita ainda a ocorrência do processo de NDS, uma vez que cria um gradiente de concentração de oxigênio dissolvido em seu interior, criando camadas aeróbias e anóxicas que mantêm condições para a integração de processos de nitrificação e desnitrificação (WIJFFELS E TRAMPER, 1995). Yamagiwa *et al.* observou eficiência de remoção de nitrogênio na faixa de 85%, quando utilizado o biofilme, e de 56% quando não utilizado. Porém, não se obteve variação significativa de remoção de DQO, em sistema operando com e sem biofilme.

Buscando-se um meio suporte eficiente para a imobilização da biomassa, tem-se empregado de forma recorrente em estudos recentes a espuma de poliuretano. Este meio suporte apresentou maiores eficiências, ao se comparar com anéis plásticos, devido a maior fixação de microrganismos no material suporte. Este material promove boas condições para o crescimento, fixação e manutenção de comunidades responsáveis pelos processos interconectados de nitrificação e desnitrificação (RIBEIRO et al., 2005; NOCKO, 2008)

3.4 Tratamentos utilizando-se como afluente o esgoto sanitário

Estudos realizados com reatores operando em escala de bancada apresentaram boa eficiência de remoção de nitrogênio do esgoto sanitário, além de remoção de carbono. (CHOWDHURY et al., 2009; CHOWDHURY et al., 2010; LIU et al., 2010; MOURA et al., 2012)

Ao se operar sistema com efluente sintético simulando o esgoto sanitário, Moura et al (2012) obtiveram taxas de eficiência de remoção de DQO e nitrogênio na faixa de 90% e 80%, respectivamente. Para tanto, utilizou-se reator em escala de bancada e leito ordenado, com porosidade de 50%

Em estudos de Chowdhury et al. (2009), observou-se altas taxas de remoção de nitrogênio (78%) e fósforo (85%). Observou-se ainda taxa de remoção de DQO do sistema na faixa de 91%. Para tanto, utilizou-se reator em escala de bancada, operando com recirculação do meio e leito fluidificado.

Com relação as formas de nitrogênio presentes no esgoto sanitário, encontram-se as de nitrogênio orgânico e amônia, sendo que existem subdivisões da primeira forma, conforme representado pela Figura 3.3:

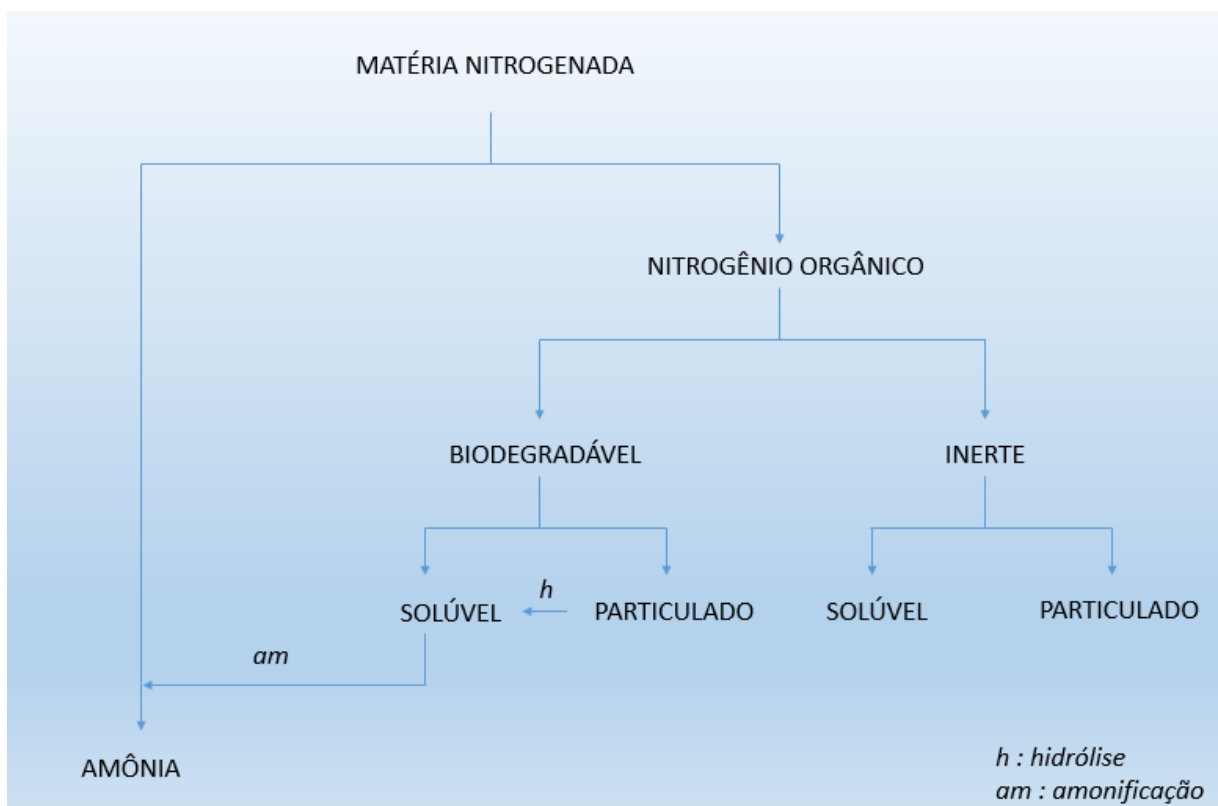


Figura 3.3 - Subdivisões e transformações da matéria nitrogenada (Adaptado de SPERLING, 1996)

A fração de nitrogênio orgânico inerte solúvel do esgoto sanitário é praticamente desprezível (SPERLING, 1996). Já a fração de nitrogênio orgânico inerte particulado está presente em maior quantidade, e usualmente deve ser considerada. Porém, com o sistema utilizado neste trabalho para alimentação do reator (conjunto de bombas, redes de filtragem e reservatórios de armazenagem de esgoto sanitário), reduziu-se esta fração a praticamente zero, de forma que todo o nitrogênio se encontrou nas formas de nitrogênio orgânico biodegradável e amônia. Assim, todo o nitrogênio presente no afluente a ser utilizado se tornou passível de ser

convertido a amônia por meio de reações de hidrólise e amonificação. Em experiência anterior utilizando-se este mesmo reator, constatou-se que, de fato, quase a totalidade do nitrogênio orgânico biodegradável foi convertido a amônia, tornando-o disponível para os processos de nitrificação ao longo do tratamento.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Reator

O reator foi construído utilizando-se o material acrílico, de formato cilíndrico, com diâmetro interno de 14,5 cm e 80 cm de altura, com volume total de aproximadamente 11,6 L, e volume útil de 6,1L. A Figura 4.1 representa esquematicamente o sistema descrito.

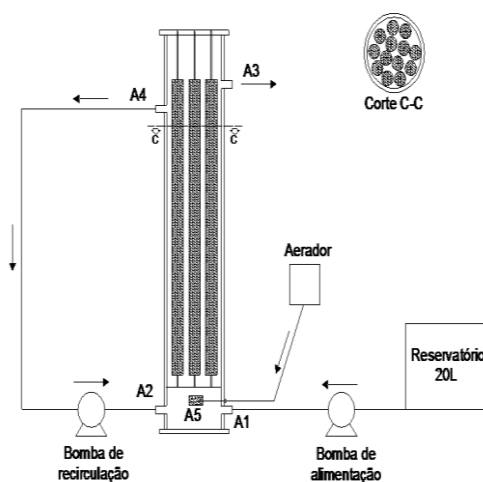


Figura 4.1 - Esquema do reator microaerado. A1: entrada do afluente; A2: entrada da recirculação; A3: saída do efluente; A4: saída para recirculação.

A alimentação do sistema foi feita de forma contínua, com entrada localizada na base do reator, representada por A1 (fluxo ascendente). A saída do efluente tratado (A3) estava situada na zona superior do reator, a 70 cm da base. Uma saída para recirculação do efluente estava localizada a 65 cm da base do reator (A4).

Tanto a alimentação quanto a recirculação foram feitas por meio de bombas dosadoras de diafragma (Figura 4.2). A razão de recirculação adotada para o reator foi a de 5, de forma a se obter as características de mistura completa. Esta razão de recirculação adotada foi baseada

em estudos empíricos realizados por Moura *et al.* (2011), utilizando-se reator com configurações semelhantes.

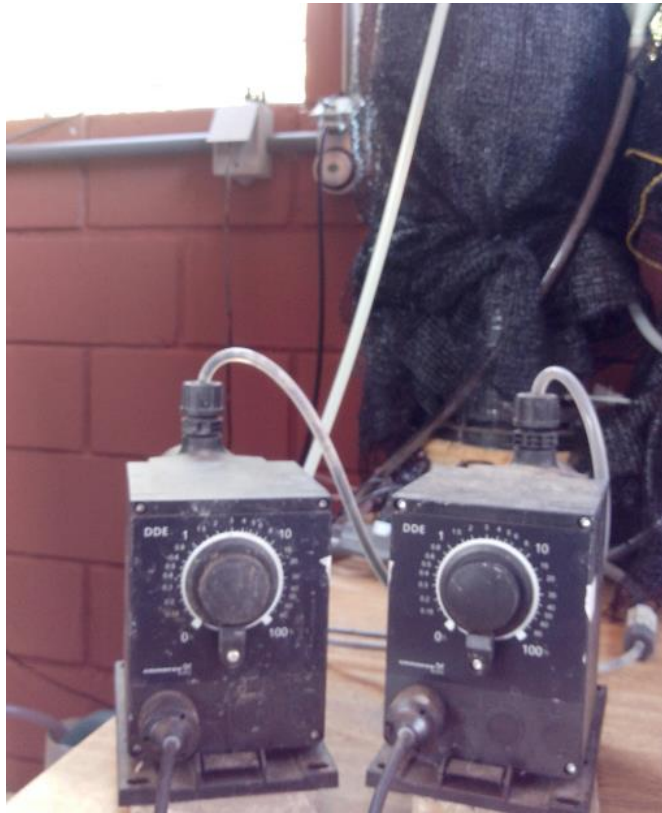


Figura 4.2 - Bombas dosadoras responsáveis pela alimentação e recirculação do reator.

O sistema foi operado a temperatura de 30°C, mantida por meio de uma mangueira acoplada ao sistema alimentada por água mantida em um reservatório termicamente regulado. Tal mangueira estava em contato com a superfície externa do reator por toda a sua extensão, em uma espiral como representado por meio da Figura 4.3.



Figura 4.3 - Sistema de manutenção da temperatura no reator

Para promover aeração no sistema, foi utilizado um aerador para aquário modelo Big Air A420 com duas saídas de ar totalizando vazão média de $1,4 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. Para o ajuste fino da aeração, foi utilizada uma válvula do tipo “T” para aeradores de aquário, conforme Figura 4.4. Para difusão do ar no meio líquido, foi utilizado inicialmente uma única pedra porosa, porém devido a problemas de difusão de oxigênio, optou-se por utilizar duas pedras. As duas configurações de pedras porosas adotadas estão representadas na Figura 4.5.



Figura 4.4 - Válvula para controle da aeração

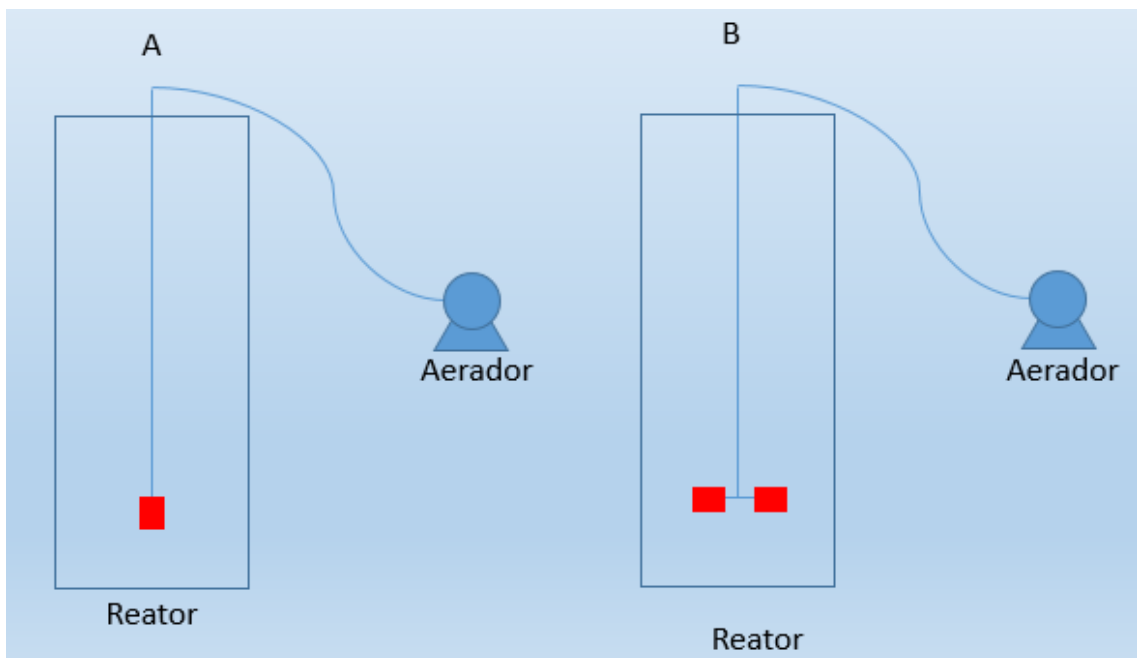


Figura 4.5 - Alteração da configuração da pedra porosa no reator. Configuração A: adotada inicialmente, com apenas uma pedra porosa para difusão (em vermelho); Configuração B: Adotada de forma definitiva, com duas pedras porosas para difusão da mesma vazão de ar.

O meio suporte foi composto por espuma de poliuretano em formato cilíndrico, com raio de 1,5 cm e comprimento de 70 cm, fixadas em hastes paralelas às paredes do reator. Sua densidade é de 22 g.L^{-1} e sua porosidade é de 92%.

O TDH do sistema foi inicialmente mantido em 12,5 horas. A porosidade do meio variou de 50% para 53,8%, 57,7%, 61,5% e 65,4%, conforme se retirou as hastes suporte, de modo a se obter um TDH final de 16,2 horas.

4.2 Inóculo

Como inóculo, foi utilizado lodo biológico proveniente da estação de tratamento de águas residuárias de fábrica de motores do grupo Volkswagen, situada na rodovia SP 215, no município de São Carlos.

4.3 Esgoto Sanitário

As características do esgoto sanitário utilizado estão apresentadas na Tabela 4.1. Considerou-se que o NTK do afluente é composto quase integralmente por amônia, após concluir-se, por meio de análises de concentração de NTK do efluente, que o residual de NTK no efluente do reator era menor que $0,5 \text{ mg/L}$. Assim, houve conversão quase integral do nitrogênio orgânico biodegradável para amônia por meio de reações de hidrólise e amonificação, conforme fluxograma apresentado no Item 3.4 – Tratamentos utilizando-se como afluente o esgoto sanitário.

Tabela 4.1–Características do esgoto sanitário

| Parâmetros | Caracterização do Afluente (2013-2014) | | |
|--|--|--------|--------|
| | Mín. | Méd. | Máx. |
| DQO Total ($\text{mg O}_2.\text{L}^{-1}$) | 143,52 | 404,87 | 759,66 |
| NTK (mg.L^{-1})/N-Amoniacal($\text{mg N-NH}_4^+.\text{L}^{-1}$) | 7,39 | 31,40 | 58,86 |

*Os valores referem-se às médias de análises realizadas nos anos de 2013 e 2014.

4.4 Análises Físico-Químicas

Os parâmetros analisados durante o experimento estão apresentados na Tabela 4.2. Todas as análises apresentadas foram realizadas de acordo com os padrões descritos no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1998), com exceção às análises de nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato, que foram realizadas em cromatógrafo de íons DIONEX (modelo ICS 5000) utilizando as colunas IonPac® AG23 Anion-Exchange Column e IonPac® CG12A Cation-Exchange Column.

Tabela 4.2 - Análises físico-químicas que serão realizadas na pesquisa

| Parâmetro/Unidade | Metologia | Número |
|--|-----------------------------|------------------------|
| pH | Potenciométrico | 4500-H+ B |
| Alcalinidade (mgCaCO ₃ .L ⁻¹) | Volumétrico | 2320 B |
| NTK | Método Semi-micro- Kjeldahl | 4500-Norg C |
| N-NH ₄ ⁺ (mgN.L ⁻¹) | Método do Fenato (FIA) | 4500-NH ₃ C |
| DQO | Colorimétrico | 5220 |
| N-NO ₃ e N-NO ₂ ⁻ (mg N.L ⁻¹) | Espec. Ultravioleta | 4500-NO ₃ B |

4.5 Procedimento Experimental

O reator já previamente inoculado teve sua vazão de alimentação fixada em aproximadamente 8,1 ml/min, para obtenção de um TDH de 12,5 horas.

Manteve-se o reator operando nestas condições por 71 dias (Etapa 1). Em seguida, iniciou-se a retirada das hastes de material suporte visando a alteração da porosidade do reator. Dessa forma, retirou-se gradualmente quatro hastes no período de 29 dias (Etapa 2), de modo a se variar a porosidade do reator de 50% para aproximadamente 65,4%.

O reator foi operado em ciclos de 3 horas, sendo 2 horas de aeração e 1 hora de não aeração, conforme recomendado por Moura et al (2012).

As análises de DQO, NTK, pH e alcalinidade foram realizadas em uma frequência de duas vezes por semana.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos dados foi dividida em duas etapas:

-Etapa 1: Porosidade de 50%: Corresponde à etapa inicial de operação, em que a porosidade do reator se manteve constante em todo o período experimental.

-Etapa 2: Retirada das hastes: Compreende à etapa de alterações sucessivas na porosidade, partindo dos iniciais 50% para 53,8%, 57,9%, 61,5% e 65,4%.

A apresentação dos resultados será feita na ordem das etapas descritas acima.

5.1 Etapa 1: Porosidade do leito de 50%

Esta etapa corresponde ao período experimental em que o reator operou com porosidade de 50%. Como foi a etapa inicial, esta etapa engloba dados de um período experimental de adaptação e refinamento operacional do reator e, subsequentemente, dados mais estáveis. Portanto, foi dividida em duas fases:

Fase A: Fase de adaptação e refinamento operacional.

Fase B: Fase estável.

5.1.1 Remoção de nitrogênio – Etapa 1

A concentração de NTK (mgN.L^{-1}), bem como a eficiência de oxidação de NTK, estão representadas na Figura 5.1. A eficiência da desnitrificação está representada na Figura 5.2, e a eficiência de remoção de nitrogênio total presente no afluente está representada na Figura 5.3.

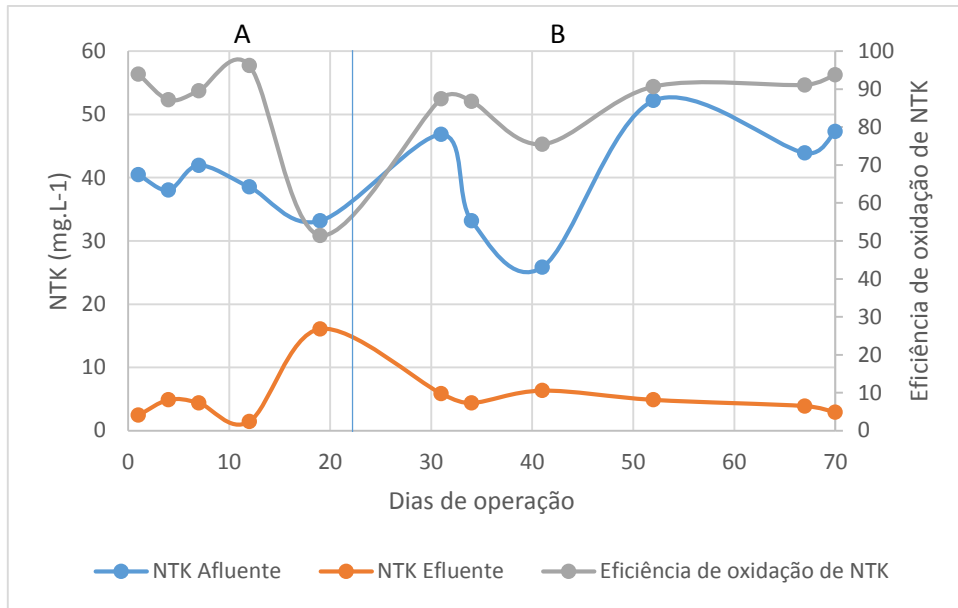


Figura 5.1 - Concentração de NTK do afluente, efluente e eficiência de oxidação de NTK para o reator operando com porosidade de 50%

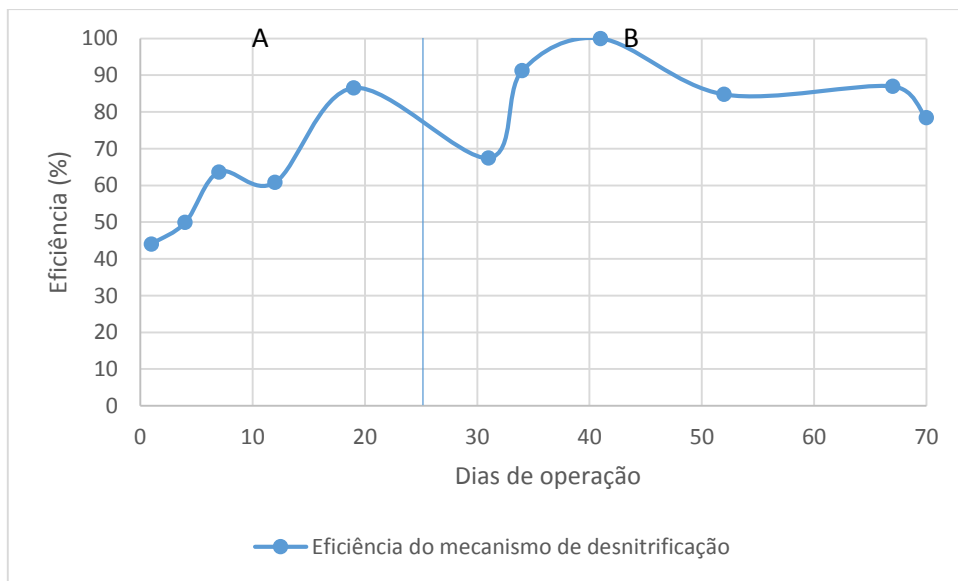


Figura 5.2 - Eficiência de conversão de óxidos de nitrogênio para N-N₂ via processo de desnitrificação para o reator operando com porosidade de 50%.

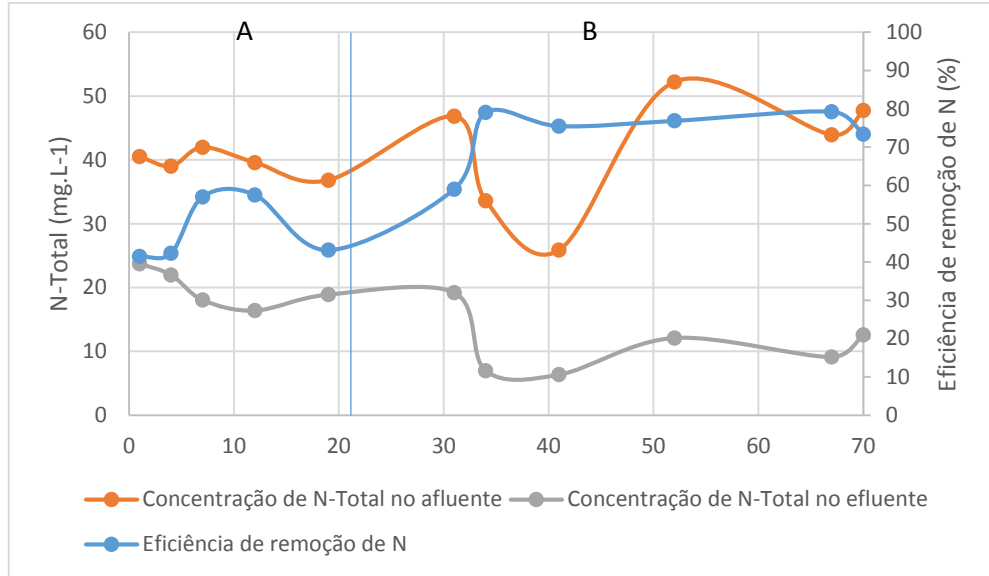


Figura 5.3 - Concentração de N-Total no afluente, efluente e eficiência de remoção de N-Total para o reator operando com porosidade de 50%

Como já discutido anteriormente, o processo de remoção de nitrogênio está diretamente relacionado com a eficiência dos processos de nitrificação e desnitrificação. A eficiência do processo de nitrificação se traduz pela eficiência de oxidação de NTK do afluente, sendo que esta foi de 83,67% na Fase A e 87,55% na Fase B, conforme representado pela Tabela 5.1. Como estas taxas se mostraram altas ao longo do experimento nas fases A e B, o processo limitante para a remoção de nitrogênio do afluente foi, em geral, o da desnitrificação, conforme observado na Tabela 5.2.

Tabela 5.1 - Concentração de NTK do afluente, efluente e eficiência de oxidação de NTK para o reator operando com porosidade de 50% - Etapa 1

| | NTK Afluente (mg.L ⁻¹) | NTK Efluente A (mg.L ⁻¹) | NTK Efluente B (mg.L ⁻¹) | Eficiência de oxidação de NTK A (%) | Eficiência de oxidação de NTK B (%) |
|-------|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Média | 40,14 ± 7,53 | 5,85 ± 5,89 | 4,72 ± 1,26 | 83,67 ± 18,35 | 87,55 ± 6,45 |

Tabela 5.2 - Eficiência de conversão de óxidos de nitrogênio para N-N₂ via desnitrificação para o reator operando com porosidade de 50%.

| | Eficiência de desnitrificação A (%) | Eficiência de desnitrificação B (%) |
|-------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Média | 61,01 ± 16,35 | 84,80 ± 11,12 |

Ao longo da operação, observou-se baixas taxas de remoção de nitrogênio nos períodos iniciais (Fase A), seguida por um aumento e estabilização na faixa 73,8% (Fase B), como representado na Tabela 5.3. Atribui-se este comportamento à fase de adaptação inicial dos microrganismos e ao ajuste do oxigênio difundido no reator pelo aerador. Com altas taxas de oxigênio dissolvido no início da operação, houve o favorecimento do desenvolvimento de bactérias heterotróficas não desnitrificantes, reduzindo a disponibilidade de elétrons às bactérias heterotróficas desnitrificantes. Além disso, valores de OD superiores a 1,0 mg.L⁻¹ durante a fase de não aeração inibem o processo de desnitrificação (SURAMPALLI *et al.*, 1997). A ocorrência de desnitrificação parcial no início da operação esteve associada, possivelmente, à resistência à difusão do oxigênio no biofilme formado no material suporte, conforme discutido por Munchet *al* (1996).

Tabela 5.3 - Concentração de N-Total no afluente, efluente e eficiência de remoção de N-Total para o reator operando com porosidade de 50% - Etapa 1

| | N-Total Afluente (mg.L ⁻¹) | N-Total Efluente A (mg.L ⁻¹) | N-Total Efluente B (mg.L ⁻¹) | Eficiência de remoção de N A (%) | Eficiência de remoção de N B (%) |
|-------|--|--|--|--|--|
| Média | 40,72 ± 7,22 | 19,80 ± 2,99 | 11,05 ± 4,74 | 48,25 ± 8,23 | 73,83 ± 7,58 |

Os valores de N-nitrito e N-nitrato do afluente e do efluente estão representados na Figura 5.4 e 5.5, respectivamente.

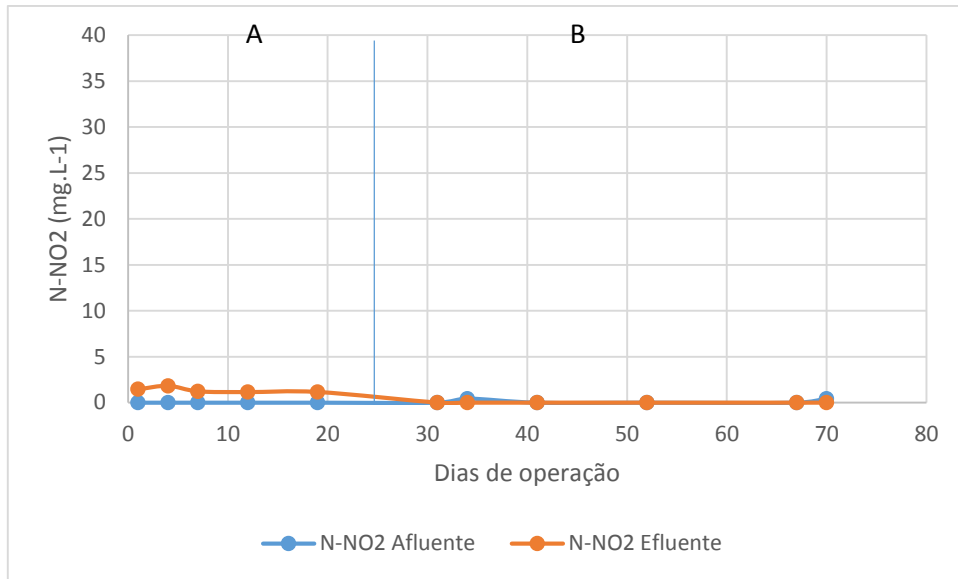


Figura 5.4 - Concentrações de N-NO₂ no afluente e efluente para o reator operando com porosidade de 50%

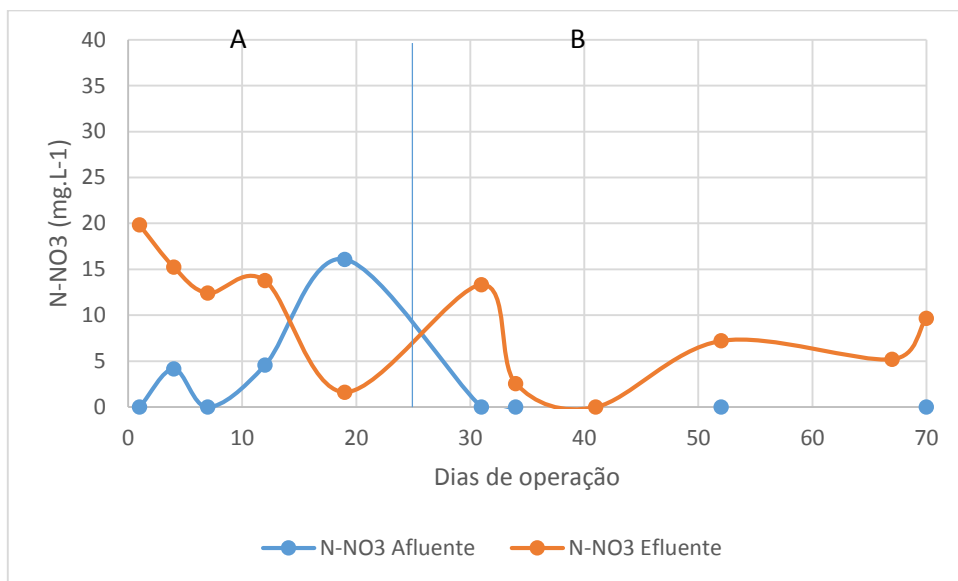


Figura 5.5 - Concentrações de N-NO₃ no afluente e efluente para o reator operando com porosidade de 50%

No período inicial de adaptação, Fase A, houve altas taxas de nitrificação, não acompanhadas por altas taxas de desnitrificação. Dessa forma, o NTK oxidado se encontrou parcialmente na forma de óxidos de nitrogênio, particularmente na forma de nitratos, como evidenciado pela Figura 5.5. Já a Fase B, com maior eficiência de desnitrificação, teve concentração média de NO₃ de 6,3 mg.L⁻¹. Os valores médios de concentração de NO₃ e NO₂ para ambas as fases estão indicados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Concentrações médias de N-nitrito e N-nitrato no afluente e efluente para o reator operando com porosidade de 50%

| | N-NO3 Afluente (mg.L ⁻¹) | N-NO2 Afluente (mg.L ⁻¹) | N-NO3 Efluente A (mg.L ⁻¹) | N-NO3 Efluente B(mg.L ⁻¹) | N-NO2 Efluente A(mg.L ⁻¹) | N-NO2 Efluente B (mg.L ⁻¹) |
|------------------|--|--|--|---|---|--|
| Média | 0,51 | 0,08 | 12,59 | 6,33 | 1,36 | 0,00 |
| Desvio Padrão | 1,11 | 0,17 | 6,73 | 4,83 | 0,29 | 0,00 |

5.1.2 Remoção de DQO – Etapa 1

A DQO do afluente e do efluente foi monitorada durante as fases A e B. Assim, pôde-se monitorar a eficiência de remoção de DQO, como representado na Figura 5.6.

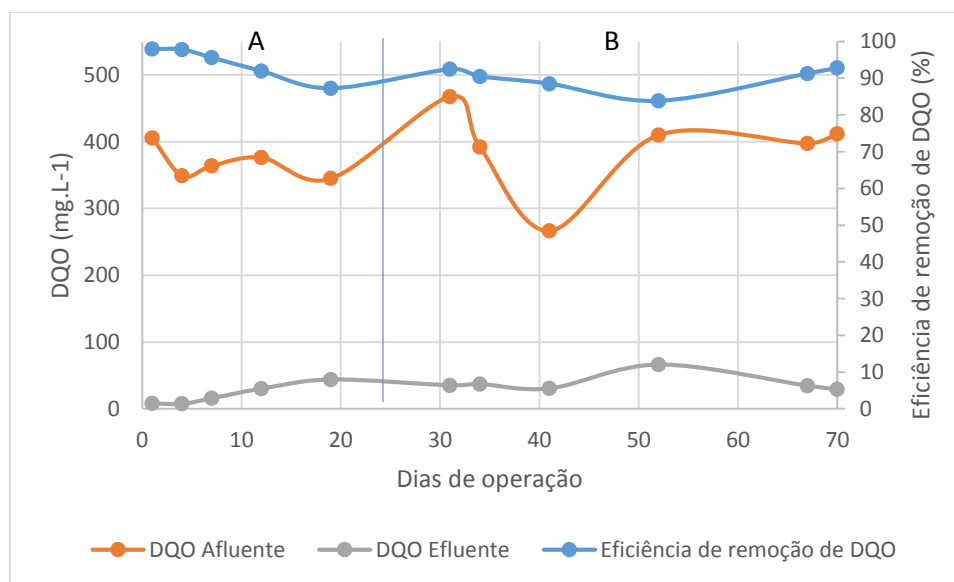


Figura 5.6 - Concentração de DQO do afluente e efluente e eficiência de remoção de DQO em reator operando com porosidade de 50%

A partir dos dados que permitiram a concepção da Figura 5.6, elaborou-se também a Tabela 5.5, relacionando os valores médios dos parâmetros anteriormente citados nos intervalos de tempo abrangidos pelas fases A e B.

Tabela 5.5 - Concentrações médias de DQO do afluente e efluente e eficiência de remoção de DQO em reator operando com porosidade de 50%

| | DQO Afluente (mg.L ⁻¹) | DQO Efluente A (mg.L ⁻¹) | DQO Efluente B (mg.L ⁻¹) | Eficiência de remoção de DQO A (%) | Eficiência de remoção de DQO B (%) |
|---------------|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Média | 380,58 | 21,27 | 39,00 | 94,11 | 89,89 |
| Desvio Padrão | 51,02 | 15,64 | 13,70 | 4,54 | 3,35 |

Os valores de eficiência de remoção de DQO se mostraram elevados ao longo de todo o período em que se manteve porosidade de 50%, incluindo a Fase A. Isso se deve ao fato de que apesar de se haver pouca atividade de desnitrificação e conseqüentemente pouco requisito de elétrons por parte da matéria orgânica para manutenção deste processo, há um aumento da concentração de microrganismos heterotróficos aeróbios de forma a se manter elevada a eficiência de remoção de DQO.

5.1.3 pH e Alcalinidade

O pH do afluente e do efluente foi monitorado ao longo do experimento, e os valores correspondentes aos dias de medição foram utilizados para montar a Figura 5.7. Os dados de alcalinidade estão apresentados na Figura 5.8 e na Tabela 5.6.

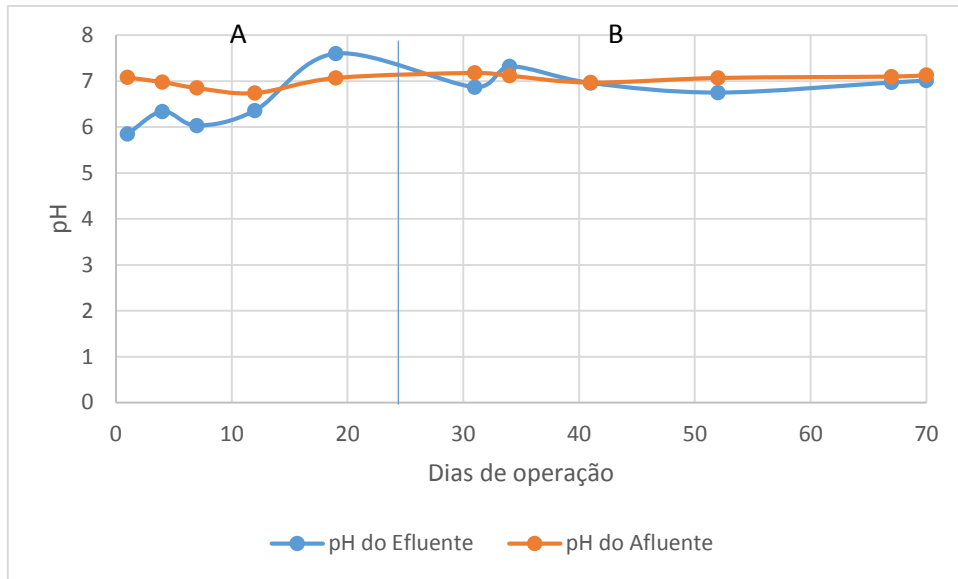


Figura 5.7 - pH do afluente e efluente em reator operando com porosidade de 50%

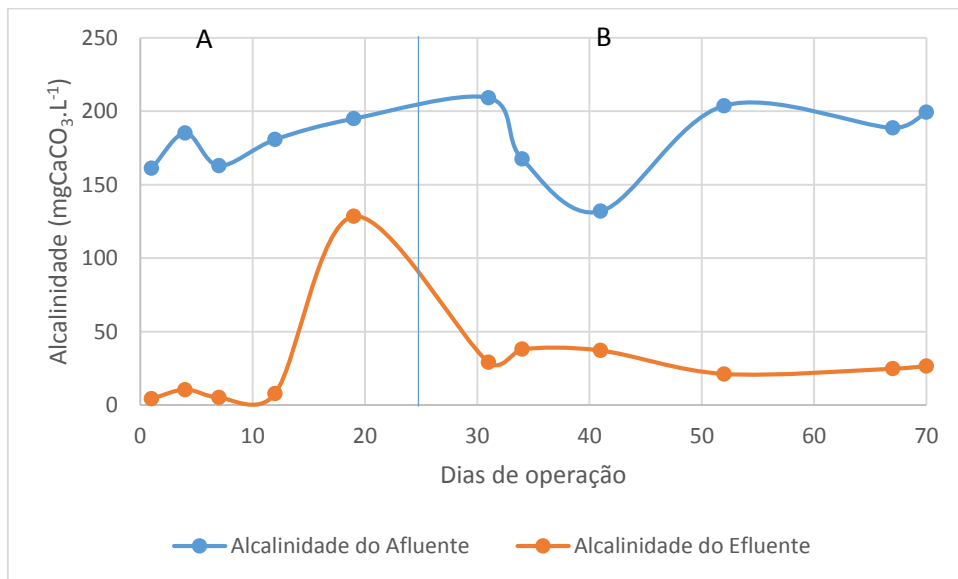


Figura 5.8 - Valores de alcalinidade total no afluente e efluente em reator operando com porosidade de 50% - Etapa 1

Tabela 5.6 - Valores médios de alcalinidade para o afluente e efluente em reator operando com porosidade de 50%

| | Alcalinidade Afluente (mgCaCO ₃ .L ⁻¹) | Alcalinidade Efluente A (mgCaCO ₃ .L ⁻¹) | Alcalinidade Efluente B (mgCaCO ₃ .L ⁻¹) |
|---------------|--|--|--|
| Média | 180,5 | 31,4 | 29,5 |
| Desvio Padrão | 22,8 | 54,3 | 6,8 |

Observou-se aumento da alcalinidade do efluente entre os períodos de adaptação e de estabilização final utilizando-se porosidade de 50%, pois com o aumento da atividade de desnitrificação característica da fase de estabilização, há uma reposição de alcalinidade consumida pelas atividades de nitrificação.

5.2 Etapa do aumento da porosidade – Etapa 2

Após à coleta de dados relativos ao reator com porosidade de 50%, iniciou-se a etapa de retirada das hastes com cilindros de material suporte. Esta etapa foi subdividida entre quatro fases, descritas a seguir:

-Fase 1: Fase em que houve a retirada de uma haste, resultando em porosidade do reator de 53,8%.

-Fase 2: Fase em que houve a retirada de mais uma haste, somando-se duas retiradas e resultando em porosidade do reator de 57,7%

-Fase 3: Fase em que houve a retirada de mais uma haste, somando-se três retiradas e resultando em porosidade do reator de 61,5%

-Fase 4: Fase em que houve a retirada de mais uma haste, somando-se quatro retiradas e resultando em porosidade do reator de 65,4%

5.2.1 Remoção de DQO – Etapa 2

A DQO foi analisada durante o período de remoção das hastes, e a partir dos dados analisados, elaborou-se a Figura 5.9 e a Tabela 5.7

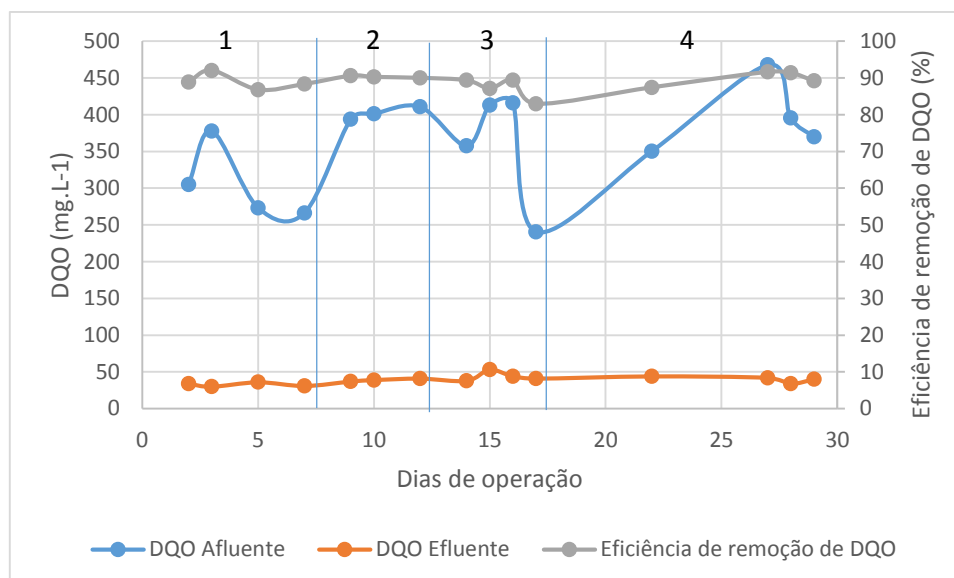


Figura 5.9 - Concentração de DQO do afluente e efluente e eficiência de remoção de DQO em reator com porosidade variável – Etapa 2

Tabela 5.7 - Concentrações médias de DQO do afluente e efluente e eficiência de remoção de DQO em reator com porosidade variável

| | DQO Afluente (mg.L ⁻¹) | DQO Efluente 1 (mg.L ⁻¹) | DQO Efluente 2 (mg.L ⁻¹) | DQO Efluente 3 (mg.L ⁻¹) | DQO Efluente 4 (mg.L ⁻¹) | Eficiência de Remoção de DQO 1 (%) | Eficiência de Remoção de DQO 2 (%) | Eficiência de Remoção de DQO 3 (%) | Eficiência de Remoção de DQO 4 (%) |
|---------------|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Média | 362,59 | 32,75 | 39,00 | 44,00 | 40,00 | 89,02 | 90,30 | 87,23 | 89,92 |
| Desvio Padrão | 64,51 | 2,75 | 2,00 | 6,48 | 4,32 | 2,20 | 0,29 | 3,03 | 1,99 |

Conforme pode ser observado, a eficiência de remoção de DQO manteve-se constante em todos os períodos, considerando-se o desvio padrão das amostras. Este comportamento mostra que mesmo com a remoção das hastes e a consequente retirada de população de bactérias aderidas a esta, não houve impacto significativo na eficiência de remoção de DQO, uma vez que a biomassa remanescente removeu adequadamente a matéria orgânica.

5.2.2 Remoção de nitrogênio – Etapa 2

As concentrações de nitrato e nitrito foram analisadas durante o período de remoção das hastes, e a partir dos dados analisados, foram elaboradas as Figuras 5.10 e 5.11.

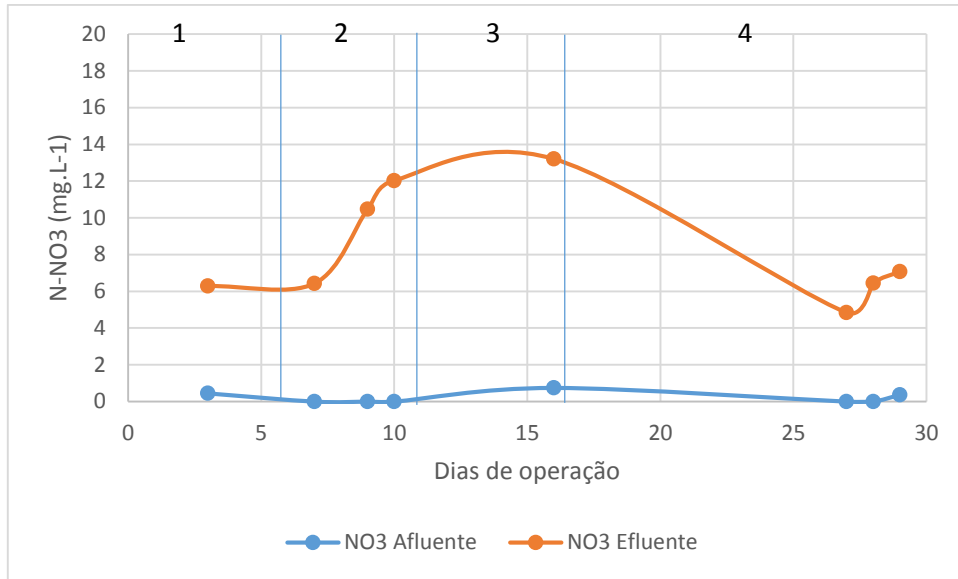


Figura 5.10 - Concentração de N-nitrato para o reator operando com porosidade variável

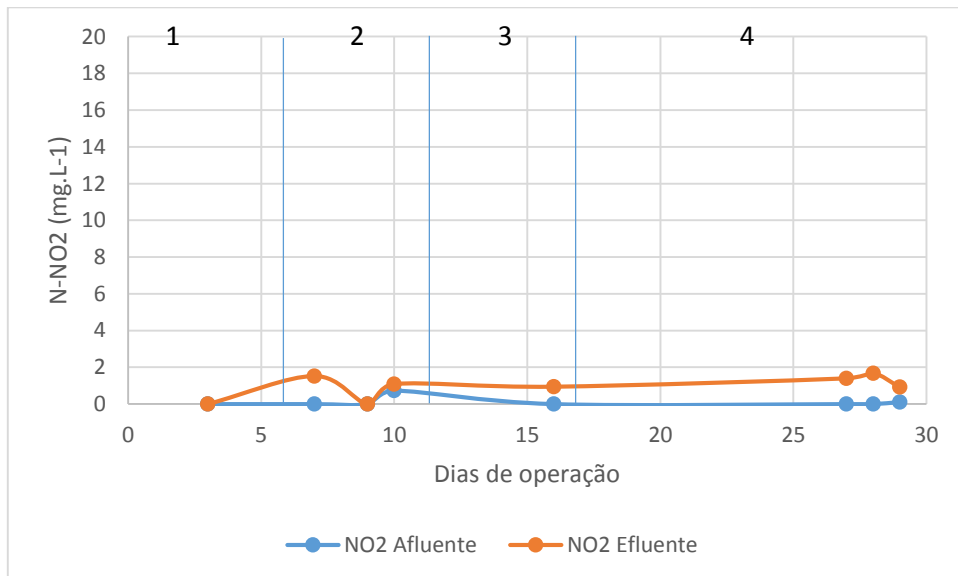


Figura 5.11 - Concentração de N-nitrito para o reator operando com porosidade variável

A concentração de N-NH_4^+ do efluente ao longo do período de retirada das hastes apresentou as características ilustradas pela Figura 5.12.

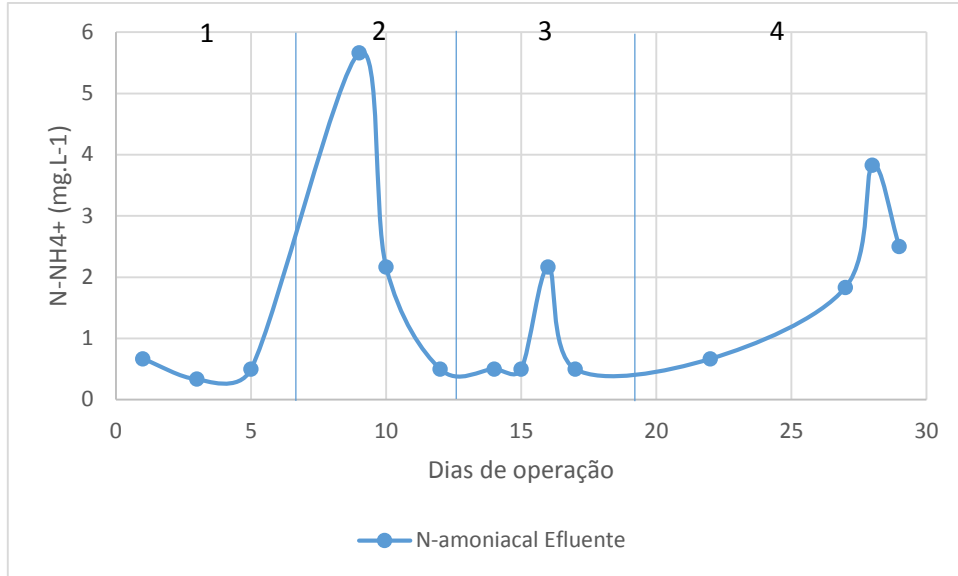


Figura 5.12 - Concentração de N-Amoniacoal do efluente no período em que o reator operou com porosidade variável

Para melhor análise do comportamento do reator frente a remoção de nitrogênio, montou-se a Figura 5.13, que reúne as informações de concentração de nitrito, nitrato e amônia no efluente do reator, além da média histórica de NTK do afluente.

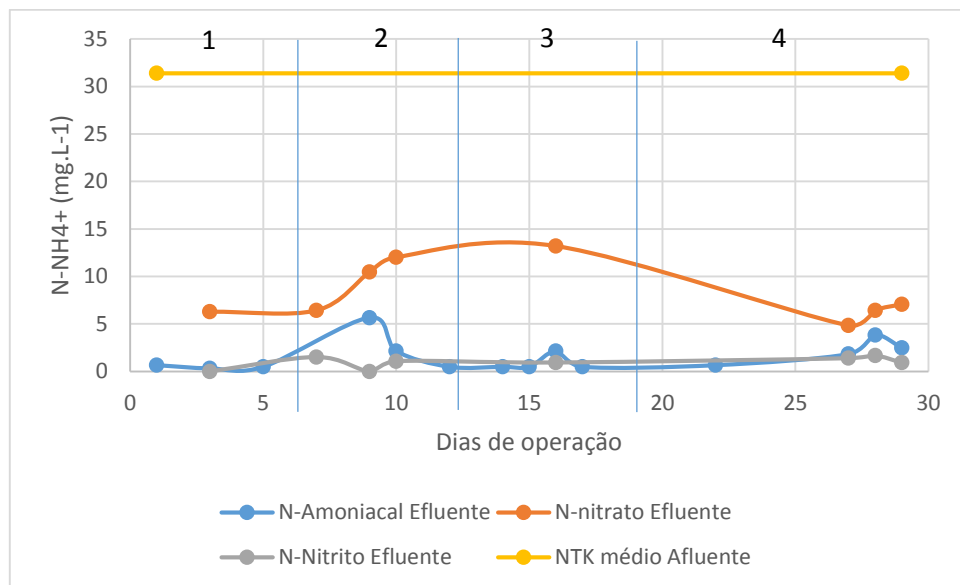


Figura 5.13 - N-amoniacoal, N-nitrito e N-nitrato do efluente, e NTK médio do afluente.

A compilação das médias das concentrações de N-nitrito, N-nitrato e N-amoniacoal e NTK afluente se encontram também na Tabela 5.8.

Tabela 5.8- Valores médios de N-amoniaco, N-nitrito e N-nitrato do efluente, e média histórica de NTK do afluente

| | Período 1 | Período 2 | Período 3 | Período 4 |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| N-NH ₄ ⁺ Efluente (mg.L ⁻¹) | 0,50 | 2,77 | 0,92 | 2,21 |
| N-NO ₂ ⁻ Efluente (mg.L ⁻¹) | 0,76 | 0,54 | 0,94 | 1,33 |
| N-NO ₃ ⁻ Efluente (mg.L ⁻¹) | 6,36 | 11,25 | 13,20 | 6,12 |
| NTK Afluente (mg.L ⁻¹) | | | | 31,4 |

De acordo com a Figura 5.13, constata-se acúmulo de nitrato a partir do período de remoção da segunda haste. A hipótese é que a redução de bactérias desnitrificantes aderidas tenha comprometido as atividades de desnitrificação devido à baixa taxa de geração dessa população em relação à população nitrificante, em função das concentrações de substratos no meio líquido. Já no período 4 observou-se queda na concentração de nitratos acompanhada de baixos valores de N-amoniaco efluente, permitindo-se concluir que houve manutenção de atividade nitrificante e recuperação da atividade desnitrificante.

A Figura 5.14 e a Tabela 5.9 representam a eficiência de remoção de nitrogênio do sistema ao longo do período de retirada das hastas. Para os cálculos de eficiência de remoção de nitrogênio da Etapa 2, utilizou-se a média histórica de NTK do afluente, representada na Tabela 4.1 do Item 4.3. Considerou-se o NTK afluente composto basicamente de amônia (item 2.4 – Tratamentos utilizando-se como afluente o esgoto sanitário), uma vez que em estudos anteriores foi possível convertê-lo totalmente por meio do mecanismo de nitrificação.

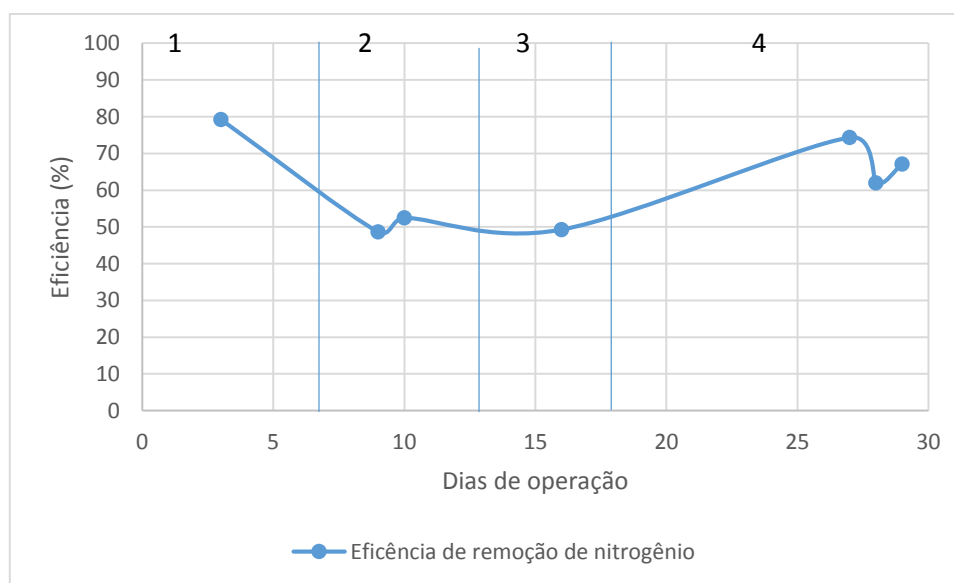


Figura 5.14 - Eficiência de remoção de nitrogênio durante o período de alteração da porosidade.

Tabela 5.9 -Valores de eficiência de remoção de nitrogênio durante o período de alteração da porosidade.

| | Período 1 (%) | Período 2 (%) | Período 3 (%) | Período4 (%) |
|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| Média | 79,21 | 50,55 | 49,27 | 67,78 |
| Desvio Padrão | - | 2,69 | - | 6,20 |

Como já era esperado, houve queda de eficiência de remoção de nitrogênio do sistema durante o Período 2 e 3, porém boa atividade nitrificante e recuperação da desnitrificantes no Período 4, traduzindo-se em aumento da eficiência de remoção para o mesmo.

Trabalhos recentes, como os de Liu et Al. (2010) (utilizando um canal de oxidação), Canto et al. (2008) (utilizando um reator sequencial em batelada), Luostarinen et al. (2006) (utilizando reator biológico com leito móvel) e Holman & Wareham (utilizando reatores sequenciais em batelada) obtiveram eficiências de remoção de N-Total de 60-70%, 80%, 70% e 75%, respectivamente. Portanto, a adoção de porosidade de 50% em um reator de leito estruturado com aeração intermitente se mostrou uma alternativa eficiente para remoção de N-Total. Com a retirada das hastes (Período 4), apesar da queda de eficiência, ainda obteve-se valor de remoção de N-Total similar aos apresentados.

5.2.3 pH e Alcalinidade – Etapa 2

A evolução dos valores de pH para o afluente e para o efluente, assim como a série de valores de alcalinidade de ambos estão representados nas Figuras 5.15 e 5.16, respectivamente.

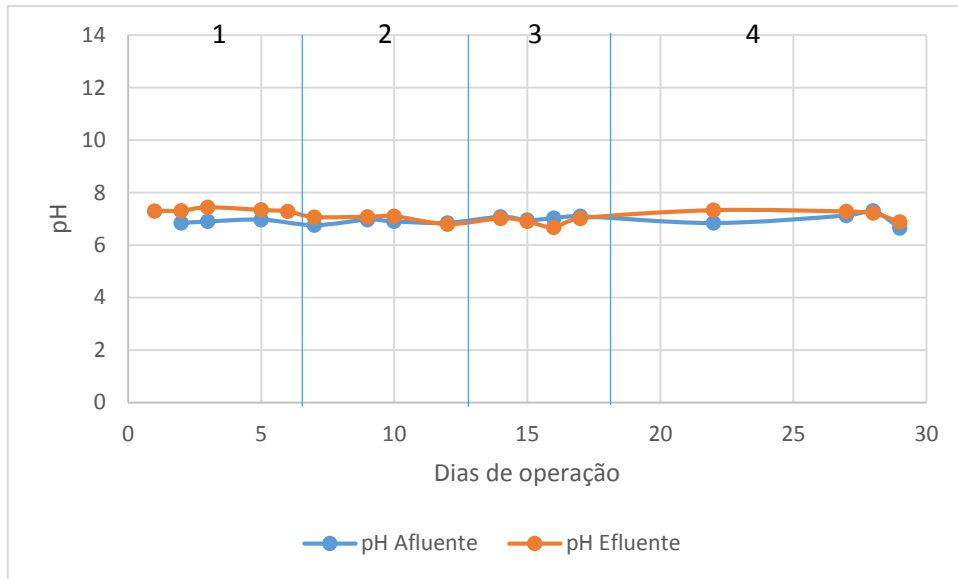


Figura 5.15 - pH do afluente e efluente com reator operando com porosidade variada.

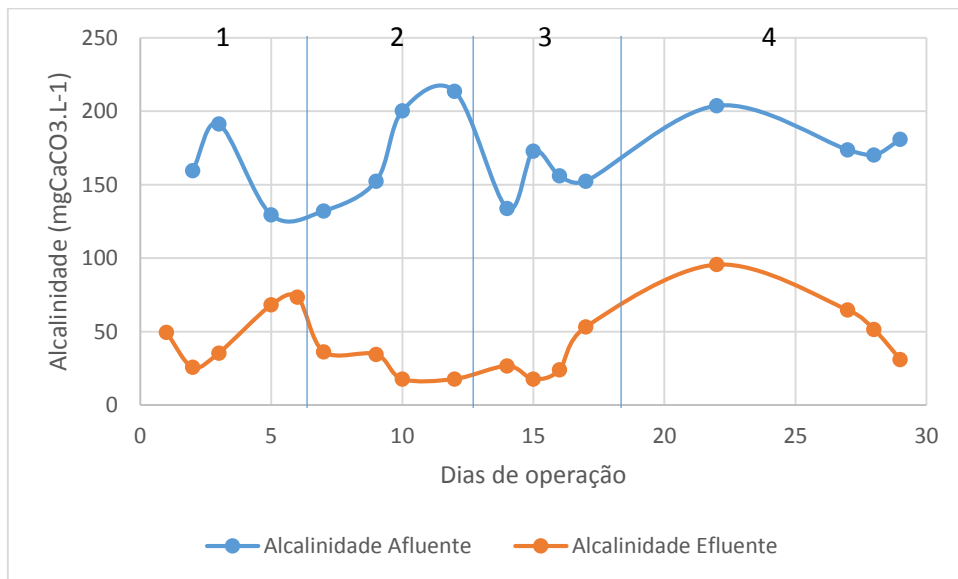


Figura 5.16 - Alcalinidade do afluente e efluente com reator operando com porosidade variada.

A média dos valores de alcalinidade do afluente e do efluente estão representadas na Tabela 5.10:

Tabela 5.10 – Valores de alcalinidade do afluente e efluente com reator operando com porosidade variada

| | Alcalinidade Afluente (mgCaCO ₃ .L ⁻¹) | Alcalinidade Efluente 1 (mgCaCO ₃ .L ⁻¹) | Alcalinidade Efluente 2 (mgCaCO ₃ .L ⁻¹) | Alcalinidade Efluente 3 (mgCaCO ₃ .L ⁻¹) | Alcalinidade Efluente 4 (mgCaCO ₃ .L ⁻¹) |
|------------------|---|---|---|---|---|
| Média | 157,6 | 48,1 | 23,3 | 30,3 | 60,7 |
| Desvio Padrão | 49,2 | 19,3 | 9,7 | 15,7 | 27,1 |

Observou-se decréscimo no valor da alcalinidade do efluente na Fase 2, alcançando média de 23,3mgCaCO₃.L⁻¹, e aumento gradual até a Fase 4, com média de 60,7mgCaCO₃.L⁻¹. Este comportamento condiz com as hipóteses levantadas anteriormente, de que houve uma queda nos processos de desnitrificação devido a retirada das hastes e conseqüentemente da população de bactérias desnitrificantes aderidas à elas, e posterior recuperação destes processos, aumentando a reposição de alcalinidade no reator.

Como não houve falta de alcalinidade no afluente, tanto na Etapa 1 quanto na Etapa 2, não houve limitação no consumo de alcalinidade relacionada aos processos de nitrificação, permitindo, subseqüentemente, que se estabelecesse os processos de desnitrificação e houvesse a oportunidade de reposição de alcalinidade inerente a este.

6 CONCLUSÕES

O reator operando com porosidade de 50% atingiu valores de remoção de N-Total de $76,2 \pm 7,80$ % e de DQO de $90,9 \pm 3,35$ %, indicando o potencial do reator na remoção simultânea de nitrogênio e matéria orgânica.

Com um aumento de 15,4% da porosidade (volume útil), observou-se uma redução de apenas 6,0% na eficiência de remoção de nitrogênio, evidenciando a boa capacidade de resiliência das populações de bactérias nitrificantes e desnitrificantes.

As alterações de porosidade sucessivas de 50% para 65,4% não resultaram em alterações significativas na eficiência de remoção de DQO, indicando que mesmo com a retirada das hastes e diminuição do consumo de DQO pelas populações de bactérias presentes nestas, a principal rota de consumo de DQO continua a ser pelas bactérias heterótrofas aeróbias, que encontram meio favorável para sua manutenção.

O desempenho satisfatório de eficiência de remoção de nitrogênio e DQO do reator após alteração de 15,4% de sua porosidade indica potencial de redução de material utilizado como meio suporte, sem grande detrimento da remoção simultânea de nitrogênio e matéria orgânica.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMASRI, M. Nitrate contamination of groundwater: A conceptual management framework. *Environmental Impact Assessment Review*, v.27, n.3, p.220–242, 2007.

APHA; AWWA; WEF. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 20ª edição. Washington, D.C. APHA. 1998.

CALIJURI, M. C. *Cianobactérias e cianotoxinas em águas continentais*. São Carlos: RIMA, 2006.

CANTO, C. S.; RODRIGUES, J. A.; RATUSZNEI, S. M.; ZAIAT, M.; FORESTI, E. Feasibility of nitrification/denitrification in a sequencing batch biofilm reactor with liquid circulation applied to post-treatment. *Bioresource Technology*, v.99, n.3, p.644-654, 2008.

CHEN, K.C.; CHEN, J.J.; YOUNG, J.U. Improvement of nitrogen-removal efficiency using immobilized microorganisms with oxidation-reduction potential monitoring. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, v.25, n.25, p.229-234, 2000.

Environmental Protection Agency (EPA). Nitrogen control. Washington (DC): US EPA; 1993.

IAMAMOTO, C. Y. *Remoção de Nitrogênio de Águas Residuárias com Elevada Concentração de Nitrogênio Amônia em Reator Contendo Biomassa em Suspensão Operado em Batelada Sequenciais e Sob Aeração Intermitente*. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

LUOSTARINEN, S.; LUSTE, S.; VALENTÍN, L.; RINTALA, J. Nitrogen removal from on-site treated anaerobic effluents using intermittently aerated moving bed biofilm reactors at low temperature. *Water research*, v.40, n.8, p.1607-1615, 2006.

METCALF, EDDY. *Wastewater engineering: treatment and reuse*. 4 ed. New York: McGraw-Hill, 2004.

MOURA, R. B.; DAMIANOVIC, M. H. R. Z.; FORESTI, E. Nitrogen and carbon removal from synthetic wastewater in a vertical structured-bed reactor under intermittent aeration. *Journal of Environmental Management*, v. 98, p. 163-167, 2012.

MUNCH, E. V.; LANT, P.; KELLER, J. Simultaneous nitrification and denitrification in bench-scale sequencing batch reactors. *Wat. Sci. Tech*, v.30, n.2, p.277-284, 1996.

NOCKO, L. M. *Remoção de carbono e nitrogênio em reator de leito móvel submetido a aeração intermitente*. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

POCHANA, K.; KELLER, J. Study of factors affecting simultaneous nitrification and denitrification (SND). *Wat. Sci. Tech*, v.39, n.6, p.61-68, 1999.

RITTMANN, B. E.; MCCARTY, P. L. *Environmental biotechnology: principles and applications*. 10020, New York, NY: McGraw-Hill; 2001.

SHARMA, B.; AHLERT, R. C. Nitrification and nitrogen removal. *Water Research*, v.11, n.10, p.897-925, 1977.

SPERLING, M. V. *Princípios básicos de tratamento de esgotos*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, v2, p. 91 – 103, 1996

TUNDISI, J. G. *Água no século XXI: enfrentando a escassez*. São Carlos: RIMA, Ite, 2003.

ZAIAT, M.; CABRAL, A. K. A.; FORESTI, E. Reator anaeróbico de leito fixo para tratamento de águas residuárias: Concepção e avaliação preliminar do desempenho. *Revista Brasileira de Engenharia – Caderno de Engenharia Química*, v.11, p.33, 1994.

ZHANG, P.; ZHOU, Q. Simultaneous nitrification and denitrification in activated sludge system under low oxygen concentration. *Environmental Science Engineering*, v.1, n.1, p.49-52, 2007.

ZHAO, H. W.; MAVINIC, D. S.; OLDHAM, W. K.; KOCH, F. A. Controlling factors for simultaneous nitrification and denitrification in a two-stage intermittent aeration process treating domestic sewage. *Water Research*, v.33, n.4, p.961-970, 1999.

ZHU, G.; PENG, Y.; WU, S.; WANG, S.; XU, S. Simultaneous nitrification and denitrification in step feeding biological nitrogen removal process. *Journal of Environmental Sciences*, v.19, n.9, p.1043-1048, 2007.