



II-158 – REATOR AERÓBIO DE LEITO MÓVEL, OPERADO SOB CONDIÇÃO TERMOFÍLICA, APLICADO AO TRATAMENTO DE EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE

Cláudia Regina Megda⁽¹⁾

Engenheira Civil. Mestre e Doutora em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP). Pós-Doutoranda em Hidráulica e Saneamento na EESC/USP.

Eduardo Cleto Pires⁽²⁾

Engenheiro Mecânico. Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP). Professor Titular do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP.

Endereço⁽¹⁾: Av. Trabalhador Sãocarlense, 400 - Centro - São Carlos - SP - CEP: 13566-590- Brasil - Tel: (16) 3373-9560, Fax: (16) 3373-9550 e-mail: crmegda@sc.usp.br

RESUMO

Dos numerosos processos de tratamento biológico de efluentes, o de lodos ativados é mais utilizado pelas indústrias de papel e celulose. Deve ser considerado, porém, que para utilização deste processo aeróbio, há necessidade do resfriamento dessas águas residuárias, normalmente liberadas em temperatura superior a 50°C. Os custos energéticos e de manutenção dos equipamentos de resfriamento tornam-se a aplicação do tratamento biológico termofílico interessante do ponto de vista econômico, uma vez que requer menor consumo energético que o tratamento mesofílico, pois não necessita de resfriamento, em vista da alta temperatura em que o efluente é produzido. A integração de processos de tratamento, combinando as vantagens dos processos aeróbios e termofílicos, mostra-se atraente. Nessa primeira fase do projeto de pesquisa foi verificada a viabilidade do tratamento de efluente sintético (polpa celulósica não branqueada) e real (efluente de papel reciclado), utilizando-se um reator aeróbio de leito móvel operado em fluxo contínuo e temperatura termofílica de 55°C, onde foram estudadas: (I) a potencialidade de uso de material suporte plástico para retenção da biomassa termofílica, (II) a eficiência de remoção de DQO do reator operado com diferente carga orgânica volumétrica para os dois efluentes estudados. O reator aeróbio foi inoculado com lodo mesofílico com gradual adaptação para a condição termofílica. Desde a partida do reator a temperatura foi fixada em 55°C. Os resultados demonstraram que a utilização do material suporte plástico demonstrou eficiência na retenção da biomassa termofílica para os dois efluentes estudados, após a aplicação de uma estratégia adotada na inoculação do reator. A eficiência de remoção de DQO atingiu 84% quando o reator foi alimentado com o efluente real. Com o efluente sintético atingiu o máximo de 63%. A temperatura termofílica de 55°C não é fator limitante para a boa eficiência do processo de tratamento, acredita-se que na composição da polpa celulósica não branqueada (licor negro) exista uma parcela tóxica que inibe as atividades dos microrganismos termofílicos, dificultando a degradação dos compostos recalcitrantes.

PALAVRAS-CHAVE: processo termofílico, reator aeróbio de leito móvel, polpa celulósica não branqueada, papel reciclado, efluentes industriais.

INTRODUÇÃO

As indústrias de papel e celulose destacam-se tanto pela sua importância econômica quanto pela geração de efluentes hídricos. Os vários setores da indústria geram efluentes hídricos que são misturados antes do tratamento, produzindo o efluente final. Essa mistura normalmente é composta pelo licor de polpação, a água de lavagem da polpa, o efluente da planta de branqueamento e, no caso de indústrias integradas que produzem a polpa e o papel no mesmo local, o efluente de máquina de papel.

Segundo REZENDE (2000), indústria com produção de polpa celulósica de 370.000 t/ano e 330.000 t/ano de papel produz um efluente hídrico de aproximadamente 2.600 m³.h⁻¹, equivalente à vazão para abastecimento de uma cidade de 400.000 habitantes

A produção de papel é uma tecnologia ampla e multidisciplinar que vem se expandindo consideravelmente nos últimos anos. O Brasil ocupa o 11º lugar entre os países produtores e o 12º entre os consumidores de



papel. Considerando a exportação, o Brasil já se situa como um dos três maiores fornecedores mundiais de papel para imprimir e escrever não revestido, à base de celulose (BNDS, 2008).

No mercado das indústrias de papel e celulose a competição é feita pelo preço e qualidade, que está associada a três necessidades quanto à produção: proteção ambiental, qualidade da polpa e redução do custo de produção. Dessa forma, os principais esforços desse tipo de indústria estão direcionados à redução do consumo de água, de energia elétrica e diminuição das cargas orgânicas lançadas nos rios.

Atualmente, as principais formas de tratamento de efluentes nas indústrias de papel e celulose têm sido por processos aeróbios, sendo o processo de lodos ativados o sistema dominante. Contudo, para o tratamento das águas residuárias dessas indústrias, há necessidade de resfriamento, visto que são lançadas em temperatura superior a 50°C.

Os custos energéticos e de manutenção de equipamentos de resfriamento têm despertado o interesse dos pesquisadores na operação dos reatores de lodos ativados em faixa de temperatura termofílica, conforme se verifica nos experimentos de (LAPARRA *et al.*, 2001; LAPARRA & ALLEMAN, 2002; SUVILAMPI *et al.*, 2003; CARMO, 2004; SUVILAMPI *et al.*, 2005 e MEGDA, 2007).

Uma das vantagens do tratamento aeróbio termofílico é a menor quantidade de lodo em excesso em processos de tratamento termofílico quando comparado ao mesofílico, garantida pelos altos requerimentos energéticos para manutenção e aos altos coeficientes de decaimento microbiano para termófilos (JAHREN *et al.*, 2002). Para outros pesquisadores, dentre as vantagens do tratamento aeróbio termofílico estão as rápidas taxas de degradação e a rápida inativação de microrganismos patogênicos. As elevadas taxas de degradação reduzem o tempo de detenção necessário para o tratamento e, conseqüentemente, compensam eventuais custos adicionais com o sistema de aeração (LAPARRA & ALLEMAN, 2002). Segundo THOMPSON *et al.* (2001) e LIAO *et al.* (2001) dois aspectos operacionais são críticos para sistema de tratamento de lodos ativados sob condições termofílicas: a manutenção de uma concentração de oxigênio dissolvido aceitável nos tanques de aeração e a manutenção de boas características de sedimentação do lodo.

Experimentos realizados por MEGDA (2007) e CARMO (2004) demonstraram que a concentração de oxigênio dissolvido não é parâmetro limitante para o tratamento aeróbio termofílico. Em alta temperatura a concentração de saturação diminui, porém aumenta o coeficiente de transferência de oxigênio tornando possível a operação de processos aeróbios.

As opiniões entre os pesquisadores em relação à formação do lodo aeróbio termofílico têm sido divergentes: experimentos de alguns autores têm reportado a formação do lodo aeróbio termofílico como mediana (STOVER & SAMUEL, 1997; JENKINS *et al.* 2003), enquanto outros a consideram excelente (BARR *et al.*, 1996).

CARMO (2004) verificou perda constante de biomassa no efluente quando operou reator de lodos ativados em fluxo contínuo em faixa de temperatura termofílica entre 45°C a 57°C, alimentado com efluente sintético pré-tratado anaerobiamente com polpa celulósica não branqueada.

MEGDA (2007) constatou que para reator de lodos ativados operado em bateladas sequenciais em temperatura de 55°C tratando água residuária sintética pré-tratada anaerobiamente com polpa celulósica não branqueada, há necessidade de se modificar a técnica empregada para separação do lodo do efluente. Segundo a autora para diminuir a perda de biomassa no efluente recomenda-se o uso de material suporte para imobilização da biomassa na operação de reator aeróbio termofílico.

Vale ressaltar que as indústrias estão implantando com sucesso, em suas unidades, sistemas de aproveitamento da energia térmica do efluente final no próprio processo de produção (VIDAL *et al.*, 2008). Portanto, baseado na realidade das indústrias, com a tendência mundial crescente de implantação deste sistema, o uso de processos aeróbios termofílicos passa ser interessante no tratamento de efluentes de indústria de papel e celulose.



Assim sendo, este projeto de pesquisa após a realização da primeira fase, cujos resultados estão apresentados neste trabalho, verificou a princípio se as vantagens teóricas do processo termofílico são aplicáveis aos efluentes sintéticos (polpa celulósica não branqueada) e reais (efluente de papel reciclado) na configuração do reator aeróbio de leito móvel, operado a temperatura termofílica de 55°C. Nas fases seguintes serão estudados outros efluentes da indústria de papel e celulose, para avaliarmos o processo de tratamento para aplicação industrial.

MATERIAIS E MÉTODOS

O reator aeróbio de leito móvel foi montado em escala de bancada. O reator aeróbio foi mantido em uma cabine de aço metálica, revestida internamente com isopor, para manter a temperatura constante. O controle da temperatura foi feito com auxílio de termostato que mantinha a temperatura termofílica em 55°C.

Reator Aeróbio de Leito Móvel

O reator aeróbio de leito móvel foi construído em acrílico, de formato cilíndrico, com diâmetro interno de 145 mm e altura total de 0,50 m e volume de tratamento de 3 L, operado em fluxo contínuo (Figura 1). O ar comprimido foi distribuído por meio de uma pedra porosa de diâmetro de 14 cm instalada 7 cm acima da base do reator. A vazão de ar será fornecida por um compressor de ar, com vazão de ar controlada por medidor. O controle da concentração de oxigênio foi feito por oxímetro e foi mantida entre 2 e 3 mg.L⁻¹. O reator foi preenchido com 70% de seu volume com meio suporte plástico de 1 cm de diâmetro externo e 1 cm de altura total para imobilização da biomassa.

Efluente sintético e real

No preparo do efluente sintético foi utilizada polpa celulósica não branqueada (licor negro) coletado em indústria de papel e celulose. Algumas análises físico-químicas relativas às características principais da água residuária serão feitas em cada lote coletado: pH, alcalinidade, ácidos voláteis, DQO, sólidos totais, voláteis e fixos, nitrogênio, fósforo. Para ser utilizada como afluente do reator, o licor negro será suplementado com quantidades de nitrogênio e fósforo recomendadas por Suvilampi *et al.* (2003). O bicarbonato de sódio será usado para tamponamento do meio e como fonte inorgânica de carbono, conforme utilizado no experimento de Jähren & Odegaard (2002). Posteriormente, o meio foi diluído em água para manter a DQO em torno de 1500 mg/L e o pH foi ajustado com ácido sulfúrico até atingir 7,0.

O licor negro foi fornecido pela indústria Votorantim Celulose e Papel - VCP, unidade de Luís Antônio - São Paulo e está caracterizado na Tabela 1. A indústria utiliza o processo Kraft e a madeira digerida é o eucalipto. Antes de entrar no reator, a água residuária sintética a ser tratada será aquecida até a temperatura de operação (55°C), utilizando-se uma resistência elétrica, ligada a um termostato.

O efluente real foi coletado na entrada da ETE da Indústria São Carlos S/A- Papel e Reciclagem no município de São Carlos/SP.

Tabela 1. Composição do licor negro usado no preparo do efluente sintético

Parâmetro	Licor Negro	Parâmetro	Licor Negro
pH	13	Pb (mg/L)	0,29
DQO (mg/L)	243.000	Cd (mg/L)	0,20
DBO (mg/L)	81.455	Ni (mg/L)	0,77
Relação DQO/DBO	2,98	Fe (mg/L)	1,56
Sulfeto (mg/L)	n.d.	Mn (mg/L)	1,80
Carbono org. total	55.110	Cu (mg/L)	1,40
Zn (mg/L)	0,74	Cr (mg/L)	n.d.

Fonte: Votorantim Celulose e Papel – VCP

Tabela 2. Composição do efluente real coletado na indústria

Dia da coleta	DQO (mg/L)	Sulfato (mg/L)	SSV (mg/L)	SST (mg/L)	pH
02/03/09	13850	200	7510	12745	6,1
08/04/09	14520	110	4960	12600	6,5
11/05/09	17240	130	7100	14380	6,6

Fonte: Indústria de São Carlos S/A

Inóculo

Lodo mesofílico da estação de tratamento de efluentes da Indústria de São Carlos S/A – Papel e Reciclagem no município de São Carlos/SP.

Operação do reator

Fases experimentais: Desde a partida do reator aeróbio a temperatura foi fixada em 55°C. A operação do reator ocorrerá em 3 fases. Cada fase representa as variações nas condições operacionais do reator aeróbio com tempo de detenção hidráulica de 48, 36 e 24 horas. Após inoculação, o reator aeróbio foi alimentado com água residuária sintética diluída, até o mesmo atingisse o total do volume útil do reator de 4 L. Logo após, a temperatura da cabine foi regulada para 55°C e foi realizada a recirculação do efluente. Por conseguinte, o reator foi mantido em batelada por alguns dias. Logo em seguida o tempo de detenção hidráulica foi fixado em 48 horas (fase I) e o reator foi operado de forma contínua, primeiramente com o efluente sintético (etapa 1) e depois com o real (etapa 2).

Análises físico-químicas e microbiológicas

Análises físico-químicas: DQO, alcalinidade, ácidos e sólidos seguem os procedimentos do “Standard Methods for the Examination of Water and the Wastewater” (APHA, 1998).

Análises microbiológicas: A diversidade microbiana e exames de microscopia ótica comum e de contraste de fase serão avaliados nas amostras do inóculo e da biomassa termofílica ao final de cada fase experimental.

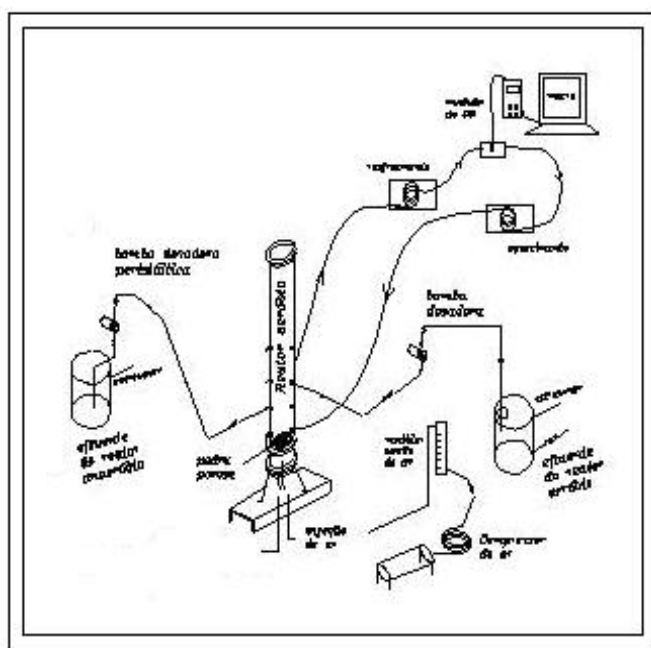


FIGURA 1. Reator aeróbio de leito móvel termofílico.



RESULTADOS DA PRIMEIRA FASE

Na primeira fase o reator aeróbio foi operado com tempo de detenção de 48 horas. Desde o primeiro dia de operação o reator foi alimentado com efluente sintético até o 40º dia de operação. A partir do 40º dia de operação, o reator começou a apresentar eficiência de remoção de DQO inicial de 20%. Do 40º dia de operação ao 53º dia, a eficiência de remoção de DQO aumentou e atingiu 63%. Depois do 53º dia foi aumentada a carga orgânica volumétrica afluente e o reator foi alimentado com efluente real e a eficiência de remoção também aumentou em 10%. Depois que a DQO afluente atingiu 2617 mg/L a eficiência de remoção atingiu 84%, de acordo com a Figura 2 a e b. No 84º dia, devido a um problema no sistema de aeração a eficiência de remoção de DQO diminuiu para 47%. Logo que a aeração foi restabelecida, o reator apresentou melhoras na eficiência de remoção.

Em relação a alcalinidade observou-se que a concentração do efluente foi maior na maioria do tempo de operação, tanto com o reator aeróbio alimentado com efluente sintético, quanto com o real. A concentração máxima no efluente foi de 412,78 mg/L e ocorreu quando o reator foi alimentado com o efluente real.

As concentrações de ácidos voláteis no efluente foram maiores quando o reator foi alimentado com efluente sintético, atingindo valores de concentração de 143,65 mg/L. Logo que o efluente foi trocado pelo efluente real, a partir do 53º dia de operação, houve uma diminuição nas concentrações de ácidos no efluente e permaneceram entre 50 e 100 mg/L até o final da primeira fase, conforme pode ser visto na Figura 2 c e d.

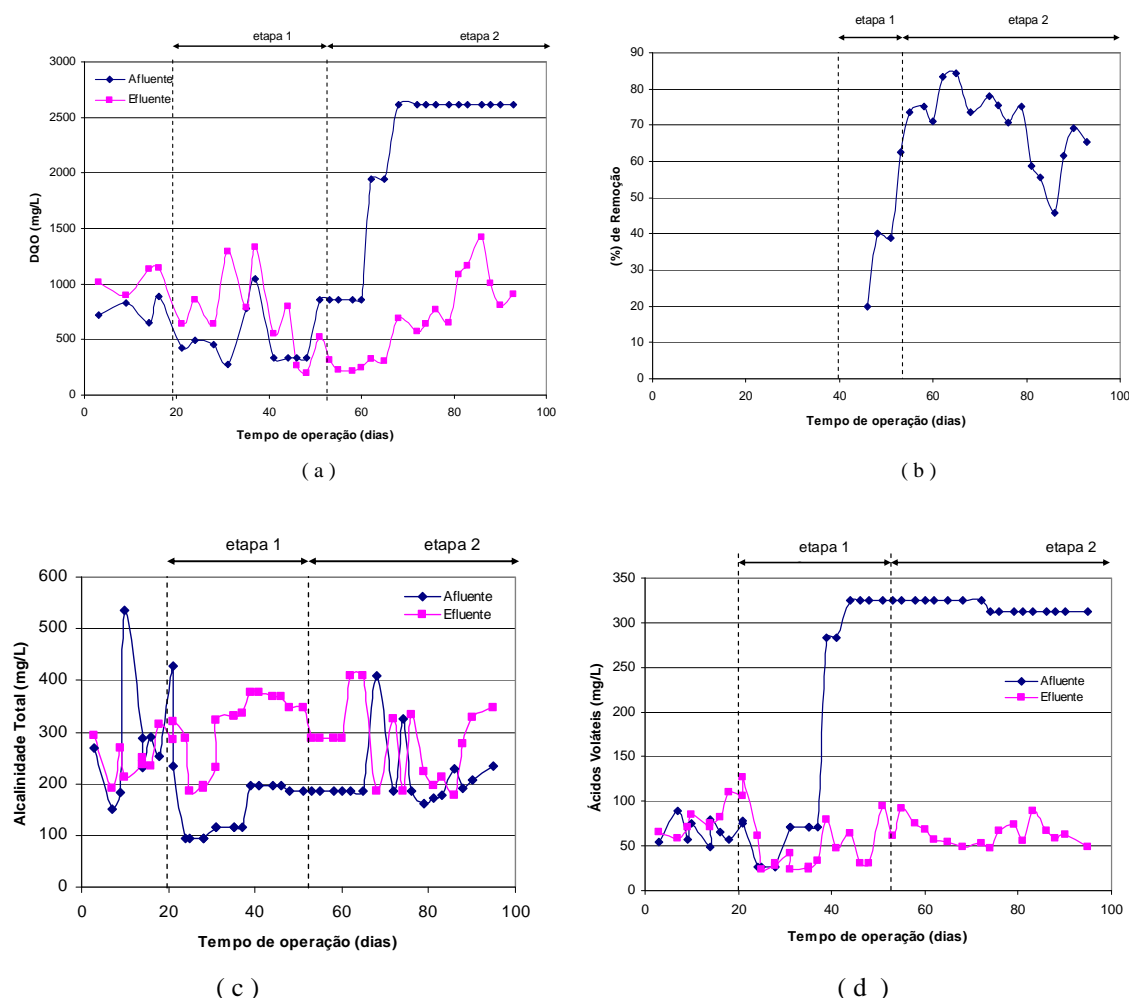


Figura 2. Valores de concentrações de DQO (a), eficiência de remoção de DQO (b), concentrações de alcalinidade total (c) e ácidos voláteis (d) no afluente e efluente do reator aeróbio de leito móvel operado em temperatura termofílica de 55°C com TDH de 48 horas.



CONCLUSÕES

Com base na primeira fase do trabalho, concluiu-se que:

A utilização do material suporte plástico demonstrou eficiência na retenção da biomassa termofílica para os dois efluentes estudados, após a aplicação de uma estratégia adotada na inoculação do reator.

A eficiência de remoção de DQO atingiu 84% quando o reator foi alimentado com efluente real. Com o efluente sintético atingiu o máximo de 63%.

A temperatura termofílica de 55°C não é fator limitante para a boa eficiência do processo de tratamento, acredita-se que na composição da polpa celulósica não branqueada (licor negro) exista uma parcela tóxica que inibe as atividades dos microrganismos termofílicos, dificultando a degradação dos compostos recalcitrantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CARMO, D.F. Tratamento biológico termofílico de efluente sintético de polpa celulósica através do Processo combinado anaeróbio-aeróbio. Tese. Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos/SP, 2004.
2. JAHREN, J.S.; RINTALA, J. A.; ODEGAARD, H. (2002). Aerobic moving bed biofilme reactor treating thermomechanical pulpung whitewater under thermophilic conditions. *Water Research*, vol.36, p.1067-1075.
3. MEGDA, C.R. Filtro Anaeróbio Ascendente combinado com reator aeróbio de lodos ativados em batelada no tratamento de água residuária sintética de indústria d e polpa celulósica não branqueada sob condições termofílicas. Tese. Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos/SP, 2007.
4. SUVILAMPI, J. Aerobic Wasterwater Treatment under high and varying temperatures: Thermophilic Process Performance and Effuent Quality. Jyväskylä, 59 p. Department of Biological and Environmental Science, University of Jyväskylä, 2003.
5. THOMPSON, G.; SWAIN, J.; KAY, M.; FORSTER, C. F. (2001). The treatment of pulp and paper effluent: a review. *Bioresource Technology*, vol.77, p.275-286.
6. VIDAL, G.; JARPA, M.; VILLAMAR, C.A. (2008). Aerobic moving bed bioreactor performance: a comparative study of removal efficiencies of Kraft mill effluents from Pinus radiate and Eucalyptus globules as raw material, *Water Science & Technology*, vol.59, p.507-514