

AUTOMAÇÃO DA DOSAGEM DE COAGULANTE PARA SISTEMAS DE FLOTAÇÃO UTILIZADOS COMO UNIDADES DE PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTES DE REATORES ANAERÓBIOS

AUTOMATION OF THE COAGULANT DOSAGE FOR FLOTATION SYSTEMS USED FOR THE POST-TREATMENT OF THE EFFLUENT OF ANAEROBIC REACTORS

André Luiz Oliveira¹ e Marco Antônio Penalva Reali²

¹Professor Doutor, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil
Avenida João Naves de Ávila, 2121 Campus Santa Mônica, 38400-902 Uberlândia, MG
E-mail: andreoliveira@feciv.ufu.br

²Professor Doutor, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Hidráulica e Saneamento
Avenida Trabalhador São-carlense, 400 Caixa Postal 359 CEP: 13560-970 São Carlos, SP
E-mail: mapreali@sc.usp.br

RESUMO

Este trabalho teve como foco principal o estabelecimento de parâmetros adequados para dosagem automatizada de cloreto férrico em função da turbidez efluente de um Reator Anaeróbio de Leito Expansível (RALEx) pós-tratado em sistema de flotação por ar dissolvido, para situações específicas. Inicialmente foram conduzidos experimentos em escala de bancada para obtenção da relação mais adequada entre os parâmetros turbidez e dosagem de cloreto férrico. Os dados obtidos resultaram em uma equação não linear, no entanto foi feito um ajuste linear de forma a possibilitar a inserção da curva na bomba dosadora que somente admitia a inserção de dados dessa forma. Posteriormente, a equação obtida foi utilizada para automatizar o fornecimento de coagulante ao sistema piloto de flotação por ar dissolvido (FAD) por meio do envio de sinais de um turbidímetro de escoamento contínuo à bomba dosadora. Ao final dos experimentos foi possível verificar o bom controle operacional do sistema RALEx/FAD fornecido pela dosagem automática de coagulante em função da turbidez do efluente do reator anaeróbio resultando na boa qualidade do efluente final que apresentou valores médios de turbidez igual a 25 uT, SST igual a 22 mg/L, DQOB igual a 59 mg/L e P-PO₄³⁻ igual a 0,8 mg/L.

Palavras-chave: automação, escoamento contínuo, flotação por ar dissolvido, reator anaeróbio de leito expansível.

ABSTRACT

This work was focused primarily on the establishment of appropriate parameters for automated dosing of ferric chloride as a function of the turbidity of the effluent from an Expandable Bed Anaerobic Reactor (RALEx) that was post-treated in a dissolved air flotation system. Initially, experiments were conducted on a small scale for obtaining the relation between the parameters most suitable dosage of turbidity and ferric chloride. The data resulted in a nonlinear equation, however a linear fit was done in order to allow the insertion of the curve in the dosing pump that requires data in this format. Later the equation obtained was used to automate the coagulant dosage sent to the dissolved air flotation pilot unit (DAF), by means of the signals obtained from a continuous flow turbidimeter that was installed at the inlet of the flotation system. At the end of the experiments it was possible to check the good operational control of the RALEx/DAF system provided by this automatic coagulant control system based on the turbidity of the anaerobic reactor effluent, thus resulting in a good quality final DAF effluent which showed average values of turbidity equal to 25 NTU, SST equal to 22 mg/L, DQOB equal a 59 mg/L and P-PO₄³⁻ equal a 0.8 mg/L.

Keywords: automation, continuous flow, dissolved air flotation, anaerobic reactor bed expandable.

1 – INTRODUÇÃO

A utilização no Brasil de sistemas de tratamento anaeróbios de efluentes domésticos encontra-se, atualmente, amplamente difundida. A resistência inicialmente existente em função dos maus odores associados ao emprego destes reatores é hoje minimizada em função dos avanços tecnológicos tanto relativos ao projeto quanto à operação do sistema. No entanto, apesar do seu estabelecimento bem sucedido, os reatores anaeróbios, em alguns casos, não produzem efluente final com qualidade compatível aos padrões de lançamento ou aos limites de enquadramento do corpo receptor

estabelecidos pela legislação ambiental Brasileira. Assim sendo, a aplicação de sistemas combinados complementares tem sido largamente explorada, em função, principalmente, da possibilidade de utilização eficaz das principais características de cada sistema, é o caso do emprego sequencial do processo de Lodos Ativados. Pode-se destacar também o sistema de Flotação por Ar Dissolvido (FAD), que por ser processo de alta taxa, com grande eficiência na remoção das partículas suspensas e flocos produzidos pela coagulação biológica e/ou química de águas residuárias (geralmente > 90% de remoção), além da remoção de fósforo, apresenta grande potencial de aplicação como pós-tratamento de efluentes

quando se exige faixas mais restritivas para os parâmetros de qualidade.

A FAD aplicada ao tratamento e ao pós-tratamento de efluentes configura alternativa atraente principalmente considerando-se as elevadas eficiências de tratamento e taxas de aplicação superficial. Constitui sistema composto pelas etapas de coagulação/floculação, responsável pela desestabilização das partículas e formação dos flocos, e flotação propriamente dita, relacionada à geração e agregação de microbolhas de ar com os flocos formados na etapa anterior. Na sequência ocorre a ascensão do agregado até superfície da unidade, para posterior remoção do lodo.

Segundo Adin (1999) a remoção de sólidos particulados já existentes ou formados pela coagulação/floculação deve-se principalmente à habilidade que as pequenas bolhas têm em aderir a tais sólidos. Edzwald e Haarhoof (2011) afirmam que a eficiência da FAD é fundamentalmente dependente da formação de pequenas bolhas de ar (dependente da pressão de saturação, tempo de saturação, dispositivo de liberação das microbolhas, dentre outros) e do contato promovido entre estas bolhas e os flocos na zona de reação.

Zabel (1984) demonstra que a qualidade final da água tratada sofre influência apenas da quantidade total de ar independente dos valores dos pares pressão/recirculação, ou seja, os valores adequados deste parâmetro podem ser obtidos por diversas combinações do binômio fração de recirculação e pressão de saturação. Entretanto, Reali (1994) enfatiza a opção de câmaras de saturação mais eficientes em detrimento da utilização de taxas de recirculação elevadas. Dependendo do tipo de efluente, como destaca Penetra (2003), as taxas de recirculação podem alcançar valores muito elevados, cerca de 50%, o que em linhas gerais significa consumo excessivo de energia, instalações mais robustas e maior investimento se não empregadas câmaras de alto desempenho.

Adicionalmente, a eficiência requerida para o sistema está intimamente ligada à eficiência da etapa de coagulação e formação dos flocos, que por sua vez requer uma dosagem ótima de coagulante (em termos de eficiência de tratamento e de custos de operação). Além disso, é importante que o sistema de dosagem de coagulante seja capaz de fornecer a concentração adequada de coagulante sob efeito de não alcançar a eficiência desejada ou encarecer o processo. Neste sentido, este trabalho procurou aperfeiçoar o processo de dosagem de coagulante na unidade de FAD em função das alterações horárias da qualidade do efluente de um Reator Anaeróbio de Leito Expansível (RALEx). O parâmetro turbidez foi escolhido em função da simplicidade de sua determinação.

2 – MÉTODOS

Este trabalho foi conduzido com a utilização de uma unidade de Flotação por Ar Dissolvido (FAD) como unidade de pós-tratamento de efluente de Reator Anaeróbio de Leito Expansível (RALEx) tratando esgoto sanitário.

O RALEx tinha volume útil de 32 m³ dividido em câmara de reação, destinada à degradação do material

orgânico, formação do biofilme e produção do biogás; e câmara de sedimentação, responsável pela separação das biopartículas e decantação do efluente. O leito do reator era composto por pneu triturado com “diâmetro” médio de 4,3mm e massa específica média de 1,14g/cm³, conforme Niciura (2005). Tinha capacidade de tratamento de 5,0 a 20,0 m³/h de esgoto sanitário e encontrava-se instalado em uma derivação de interceptor da rede pública da cidade de São Carlos, SP dentro do campus da USP.

O sistema de Flotação por Ar Dissolvido (FAD) era constituído por dois floculadores mecanizados cilíndricos e um tanque de flotação também cilíndrico.

Após passagem pelo dispositivo de mistura rápida do coagulante o esgoto era encaminhado à unidade de floculação, constituída de dois floculadores mecanizados que tinham altura de 3,0 m e diâmetro de 0,8 m com volume útil de 1,58 m³. A saída do efluente coagulado/floculado era feita na parte inferior do floculador. Os motorreductores dos agitadores, situados na parte superior da unidade de floculação, eram controlados por inversor de frequência que permitia a variação da rotação do motor e mantinha o gradiente de velocidade imposto à massa líquida dentro do limite escolhido.

Ao sair dos floculadores, o esgoto floculado era misturado à vazão de recirculação pressurizada, proveniente da câmara de saturação, imediatamente antes da zona de contato. Os agregados flocos/microbolhas formados eram encaminhados à superfície da zona de flotação sob efeito do empuxo da água, da qual eram removidos por meio de raspador mecanizado localizado na parte superior da unidade. A água clarificada saía pela parte inferior da unidade dotada de placa plana com diversos orifícios. Tais orifícios foram previstos em número e diâmetro adequado para o correto direcionamento do fluxo, em função da perda de carga provocada.

Neste sistema o efluente do RALEx recebia coagulante por meio de misturador tubular “in line” conectado a sistema automático de dosagem de coagulante composto por bomba dosadora e turbidímetro de escoamento contínuo. A depender da qualidade do efluente do RALEx, considerando-se o parâmetro turbidez, o equipamento de medição enviava para a bomba dosadora sinal variável entre 4 a 20 mA, limites para menor e maior turbidez, respectivamente, o que significava menor e maior dosagem de cloreto férrico. O parâmetro turbidez foi utilizado na automação em função da simplicidade e disponibilidade de equipamentos. Em seguida o efluente coagulado era encaminhado aos floculadores mecanizados para oportunidade de choque entre as partículas e consequente formação dos flocos.

A unidade de mistura rápida fazia parte da própria tubulação de alimentação da unidade de flotação e constituía-se basicamente por dois tubos concêntricos com comprimento de 10 cm. O coagulante era injetado no espaço entre os tubos e incorporado à massa líquida por meio de diversos orifícios existentes na placa de PVC utilizada para criar o compartimento entre os tubos. Tal configuração imprimia altos gradientes de velocidade pela redução e ampliação abruptas no diâmetro da tubulação

(50 mm → 25 mm → 50 mm). O coagulante era injetado no ponto de ampliação do misturador no qual havia maior dissipação de energia perfazendo-se gradientes de velocidade entre de 2000 s^{-1} a 7000 s^{-1} aproximadamente.

As Figuras 1a e 1b ilustram o Reator Anaeróbio de Leito Expansível e a unidade de Flotação por Ar Dissolvido utilizados neste trabalho.

O equipamento de bancada “flotateste” utilizado para obtenção da curva de dosagem de cloreto férrico em função da turbidez do efluente do RALEx foi proposto por Reali (1991). Tal equipamento era composto por quatro colunas cilíndricas de acrílico com capacidade útil de 2,5 litros, independentes entre si e interligadas a uma câmara de saturação. Cada coluna possuía agitador próprio (tipo eixo vertical, paletas paralelas ao eixo, dois braços e uma paleta por braço) impulsionado por meio de conjunto motorreductor e ligado a um regulador de rotação para controle do gradiente de velocidade da floculação.

A câmara de saturação, na qual eram interligadas as colunas de flotação, foi construída com tubo de acrílico com volume útil de 7,8 litros.

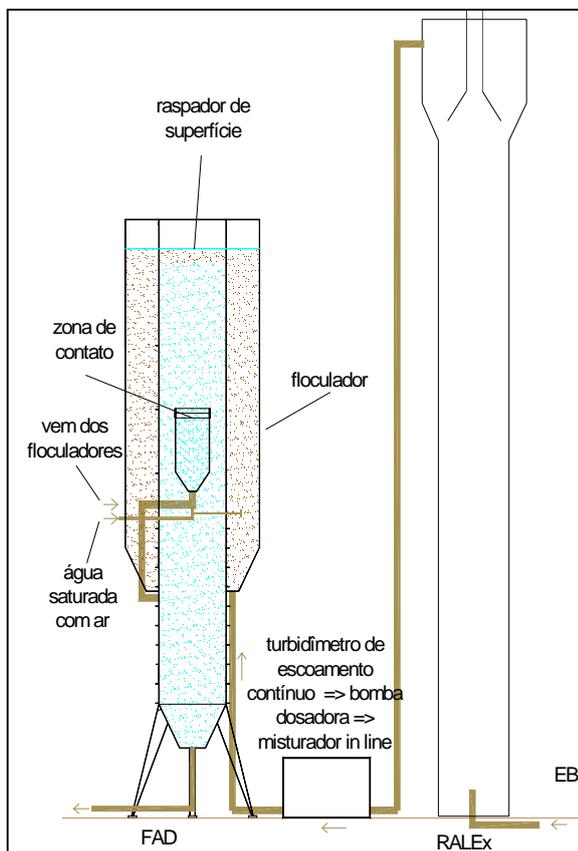


Figura 1a – Ilustração do sistema composto por Reator Anaeróbio de Leito Expansível (RALEx) seguido de Flotador (FAD)



Figura 1b – Fotografia da unidade de Flotação por Ar Dissolvido (FAD)

Legenda: 1) zona de contato/clarificação, 2) flocoadores, 3) filtro, 4) coleta de lodo, 5) câmara de saturação, 6) bomba dosadora, 7) solução de cloreto férrico, 8) turbidímetro de escoamento contínuo.

Para sua operação e controle, a câmara de saturação possuía manômetro, válvula de segurança, entrada e saída de ar comprimido e entrada de água proveniente da rede de abastecimento público. As câmaras de flotação eram dotadas de pequenos orifícios existentes ao longo da altura das colunas para coleta de amostras.

A partir da caracterização das amostras coletadas em diferentes datas de operação do sistema e em diferentes horários do dia foram construídas as “curvas de flotação”, conforme método proposto por Reali (1991), e elaborada a curva de Dosagem de Cloreto Férrico (DCF) em função da turbidez efluente do RALEx para velocidade de flotação de $17,5 \text{ cm/min}$, escolhida por ser a velocidade de flotação média utilizada na unidade piloto de flotação por ar dissolvido (FAD).

Inicialmente foram conduzidos os experimentos relacionados à elaboração da curva de relação entre a DCF e a turbidez do efluente do Reator Anaeróbio de Leito Expansível (RALEx). No primeiro ensaio, com coleta de amostras do efluente do RALEx realizada às 08:00 horas, foi variada a DCF de 30 mg/L a 100 mg/L , o tempo de floculação (T_F) de 10 min a 22 min , o gradiente de velocidade de floculação (G_F) de 60 s^{-1} a 100 s^{-1} , a taxa de recirculação (R) de 10% a 30% , mantidos constantes tempo de mistura rápida (T_{mr}) igual a 10 s (a mistura rápida era realizada no equipamento *Jartest* e imediatamente o efluente era vertido para os jarros de flotação), gradiente de mistura rápida (G_{mr}) igual a 1000 s^{-1} e pressão de saturação (P_{sat}) igual a 450 kPa (mantido fixo tempo de saturação (T_{sat}) igual a 10 min). No segundo ensaio, com coleta realizada às 08:00 horas, foi variada a DCF de 0 mg/L a 160 mg/L mantendo-se fixos o $T_{mr} = 10 \text{ s}$, o $G_{mr} = 1000 \text{ s}^{-1}$ (para o teste sem coagulante não houve mistura rápida), o $T_F = 20 \text{ min}$, o $G_F = 90 \text{ s}^{-1}$, a $R = 10\%$, a $P_{sat} = 450 \text{ kPa}$ e $T_{sat} = 10 \text{ min}$. No terceiro ensaio foram realizadas coletas às 9:00, 11:00, 13:00, 15:00, 17:00 e 19:00 horas com DCF variando de 60 a 75 mg/L , 65 a 80

mg/L, 65 a 90 mg/L, 80 a 110 mg/L, 80 a 110 mg/L, 80 a 110 mg/L, respectivamente, mantidos fixos o $T_{mr} = 10$ s, $G_{mr} = 1000$ s⁻¹, $T_F = 20$ min, $G_F = 90$ s⁻¹, $R = 10\%$, $P_{sat} = 450$ kPa e $T_{sat} = 10$ min. No quarto ensaio foram realizadas coletas de amostras às 9:00, 12:00, 15:00 e 18:00 horas. Foram mantidos fixos o $T_{mr} = 10$ s, o $G_{mr} = 1000$ s⁻¹, o $T_F = 20$ min, o $G_F = 90$ s⁻¹, a $R = 10\%$, $P_{sat} = 450$ kPa e $T_{sat} = 10$ min, variando-se as DCF de 0 mg/L a 90 mg/L.

Após elaboração da curva de relação entre a DCF e a turbidez efluente do RALEx foram conduzidos ensaios utilizando-se a unidade de FAD em escala piloto (fluxo contínuo) com coletas de amostras de três em três horas, a qual foi operada com taxas de aplicação superficial de 200 m³/m².dia, 250 m³/m².dia, 300 m³/m².dia, ou seja, velocidade de flotação de 13,8 cm/min, 17,4 cm/min e 20,8 cm/min, respectivamente. Foram realizados testes preliminares na câmara de saturação nos quais foram avaliadas taxas de aplicação superficial de 100 m³/m².dia a 600 m³/m².dia (que representam diferentes T_{sat}). Não houve decréscimo acentuado na eficiência de saturação, visto que a quantidade de ar disponível para o processo de flotação passou de 79,9 g_{ar}/m³ para 77,8 g_{ar}/m³, respectivamente. As concentrações de ar (S^*) disponíveis em função da configuração de operação do sistema são ilustradas na descrição dos respectivos ensaios.

Foram conduzidos nove ensaios e os parâmetros fixos para cada ensaio foram: Ensaio 1: $P_{sat} = 450 \pm 10$ kPa, $T_F = 20$ min, $G_F = 90$ s⁻¹, $TAS = 200$ m³/m².dia, $R = 10\%$ ($S^* = 8$ g_{ar}/m³); Ensaio 2: $P_{sat} = 450 \pm 10$ kPa, $T_F = 20$ min, $G_F = 90$ s⁻¹, $TAS = 200$ m³/m².dia, $R = 15\%$ ($S^* = 12$ g_{ar}/m³); Ensaio 3: $P_{sat} = 450 \pm 10$ kPa, $T_F = 20$ min, $G_F = 90$ s⁻¹, $TAS = 200$ m³/m².dia, $R = 20\%$ ($S^* = 16$ g_{ar}/m³); Ensaio 4: $P_{sat} = 450 \pm 10$ kPa, $T_F = 20$ min, $G_F = 90$ s⁻¹, $TAS = 250$ m³/m².dia, $R = 10\%$ ($S^* = 8$ g_{ar}/m³); Ensaio 5: $P_{sat} = 450 \pm 10$ kPa, $T_F = 20$ min, $G_F = 90$ s⁻¹, $TAS = 250$ m³/m².dia, $R = 15\%$ ($S^* = 12$ g_{ar}/m³); Ensaio 6: $P_{sat} = 450 \pm 10$ kPa, $T_F = 20$ min, $G_F = 90$ s⁻¹, $TAS = 250$ m³/m².dia, $R = 20\%$ ($S^* = 16$ g_{ar}/m³); Ensaio 7: $P_{sat} = 450 \pm 10$ kPa, $T_F = 15$ min, $G_F = 90$ s⁻¹, $TAS = 300$ m³/m².dia, $R = 10\%$ ($S^* = 8$ g_{ar}/m³); Ensaio 8: $P_{sat} = 450 \pm 10$ kPa, $T_F = 15$ min, $G_F = 90$ s⁻¹, $TAS = 300$ m³/m².dia, $R = 15\%$ ($S^* = 12$ g_{ar}/m³); Ensaio 9: $P_{sat} = 450 \pm 10$ kPa, $T_F = 15$ min (em função dos volumes dos floculadores e vazão afluente não foi possível a manutenção de $T_F = 20$ min), $G_F = 90$ s⁻¹, $TAS = 300$ m³/m².dia, $R = 20\%$ ($S^* = 16$ g_{ar}/m³).

Os valores de S^* representam a quantidade de ar fornecida ao processo, em g de ar dissolvido (e liberável) por m³ de esgoto afluente. A vazão afluente ao sistema foi de 4,75 m³/h para os seis primeiros ensaios e de 6,34 m³/h para os demais.

A solução de cloreto férrico utilizada neste trabalho foi do tipo comercial e apresentava, conforme fabricante, densidade de 1,410 g/cm³ e 38% a 40% de FeCl₃ (correspondente à quantidade em FeCl₃ sendo que a diferença entre as massas dos compostos hexahidratado e anidro foram consideradas para a pesagem do sal e preparo da solução).

3 – RESULTADOS

A partir da análise dos resultados obtidos utilizando-se o flotor em escala de bancada foram escolhidos os valores de DCF que conduziam a eficiências de remoção de turbidez superiores a 90%. Os valores medidos para a turbidez remanescente do efluente flotado, relativos ao primeiro ensaio, permaneceram praticamente inalterados com aplicação de DCF acima de 65mg/L, no entanto, DCF da ordem de 50 mg/L já forneceram resultados significativos, com frações remanescentes de turbidez próximas a 5%, considerando-se a turbidez do efluente do RALEx de 35 uT. Já para o ensaio 2, cuja turbidez do efluente do RALEx foi de 50 uT, para turbidez residual abaixo de 10% foi necessária DCF acima de 55 mg/L. Nos ensaios 3 e 4, nos quais foram realizadas coletas ao longo do dia de operação do RALEx, houve variação da turbidez do efluente de 110 uT a 280 uT e de 67,3 uT a 199 uT, respectivamente. Para estes valores observados, e considerando-se eficiência de remoção de turbidez acima de 90% foram necessárias DCF de 60 mg/L a 110 mg/L e 50 mg/L a 90 mg/L. A Figura 2 ilustra os dados obtidos e a equação encontrada.

Após análise de todos os resultados foi possível a obtenção de correlação entre a turbidez do efluente do RALEx e a DCF necessária para manutenção da qualidade final do efluente mesmo sob as condições variáveis na qualidade do efluente do RALEx. É importante salientar que o objetivo principal destes ensaios foi fornecer subsídios para obtenção de DCF necessárias para o bom funcionamento do sistema de flotação por ar dissolvido.

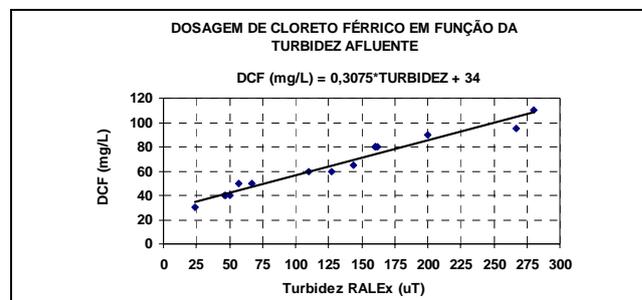


Figura 2 – Dados para obtenção da função de relação entre DCF e turbidez do efluente do RALEx, obtidos na unidade FAD em escala de bancada (flotatest) com alimentação por batelada.

Os pares de dados turbidez x DCF obtidos a partir da equação ilustrada na Figura 2 foram inseridos no sistema de dosagem automática de cloreto férrico (turbidímetro de escoamento contínuo / bomba dosadora), integrante do sistema.

As Figuras 3a, 3b, 3c, 3d, 3e, 3f, 3g, 3h e 3i ilustram os resultados obtidos com a utilização da instalação piloto de flotação a partir da DCF otimizada, em função dos dados anteriores. Os gráficos apresentados foram elaborados em termos da concentração de Fe³⁺ que representa uma parcela da concentração total de cloreto férrico.

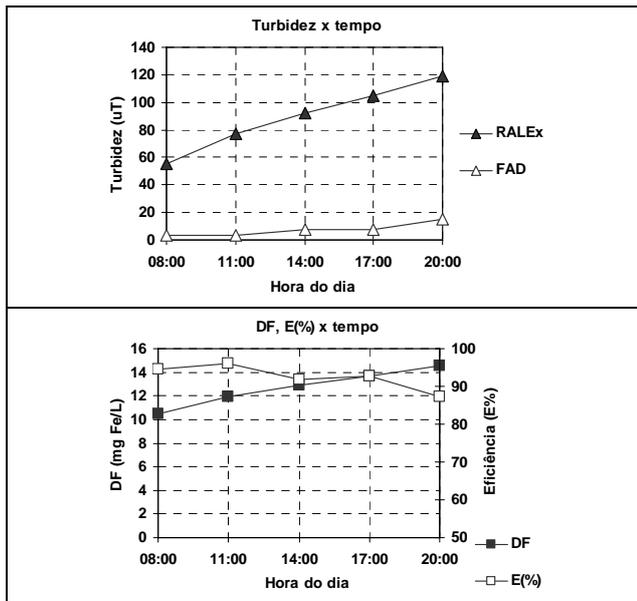


Figura 3a – Resultados do ensaio 1 obtidos na operação do sistema de Flotação por Ar Dissolvido em escala piloto com escoamento contínuo, conforme parâmetros do ensaio 1.

Conforme ilustra a Figura 3a o efluente do RALEX teve aumento progressivo de turbidez durante o dia, em função disto, houve também o aumento da Dosagem de Fe^{3+} (DF) no flotador para manutenção da remoção de turbidez acima de 90%, conforme avaliação preliminar. Entretanto percebe-se que no último horário de coleta de amostra (20:00 h) houve remoção de turbidez abaixo deste valor. Esta situação ocorre em todos os ensaios, conforme pode ser observado nas Figuras apresentadas.

A Figura 3b ilustra, também o acréscimo nos valores medidos para a turbidez do efluente do RALEX. Este aumento progressivo está diretamente relacionado à deterioração ao longo do dia da qualidade do Esgoto Bruto (EB) afluente ao reator. A principal razão desta alteração é a mudança nas atividades antrópicas neste período. Novamente foi possível observar valores de remoção de turbidez abaixo dos 90% preliminarmente desejados.

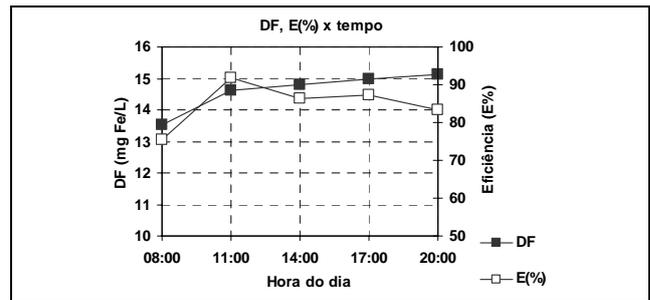
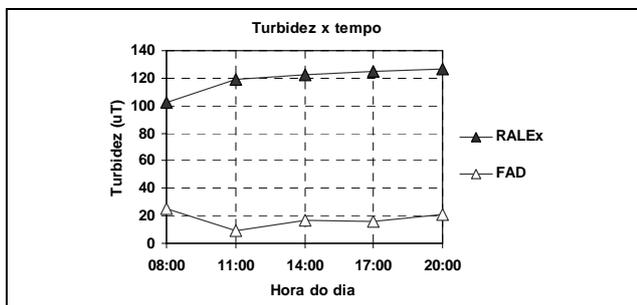


Figura 3b – Resultados obtidos na operação do sistema de Flotação por Ar Dissolvido em escala piloto com escoamento contínuo, conforme parâmetros do ensaio 2.

No ensaio 3 (Figura 3c) a porcentagem de remoção de turbidez permaneceu em torno de 85% havendo também o aumento gradativo da DF em função do aumento da turbidez do efluente do RALEX.

Nos ensaios 4, 5 e 6 houve alteração da taxa de aplicação superficial de $200 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ para $250 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, com redução da porcentagem de remoção de turbidez pela unidade de FAD. Apesar da redução na taxa de remoção de turbidez não ser muito expressiva pode-se inferir que as condições hidrodinâmicas neste caso exerceram influência negativa ao funcionamento do sistema.

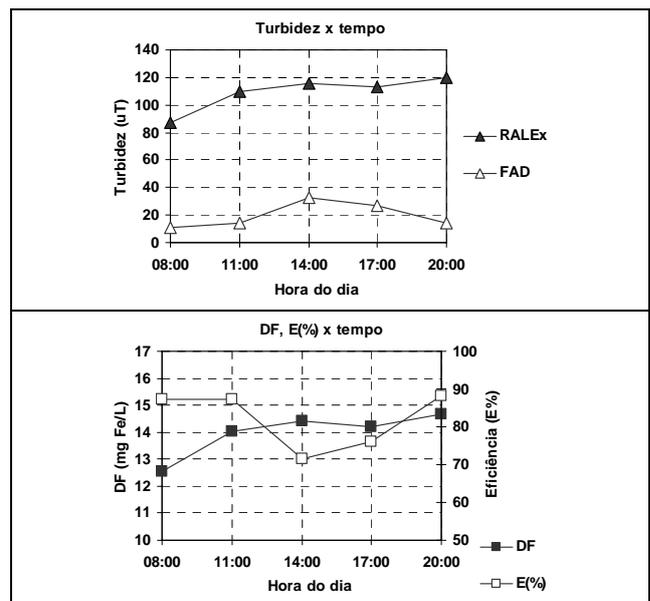


Figura 3c – Resultados obtidos na operação do sistema de Flotação por Ar Dissolvido em escala piloto com escoamento contínuo, conforme parâmetros do ensaio 3.

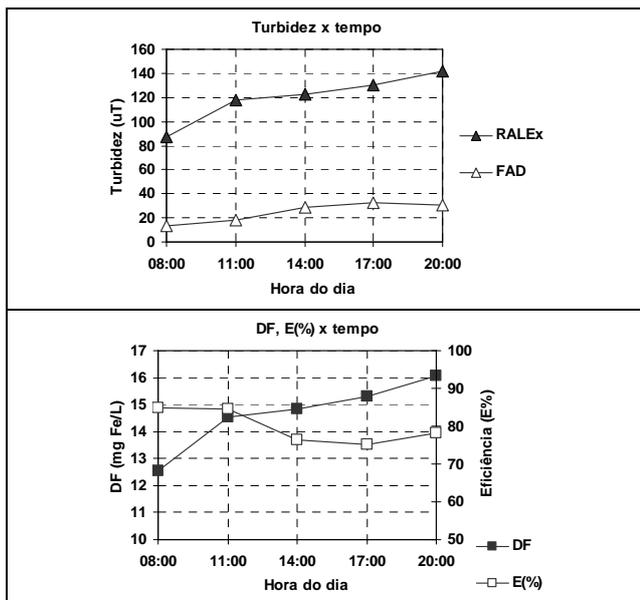


Figura 3d – Resultados obtidos na operação do sistema de Flotação por Ar Dissolvido em escala piloto com escoamento contínuo, conforme parâmetros do ensaio 4.

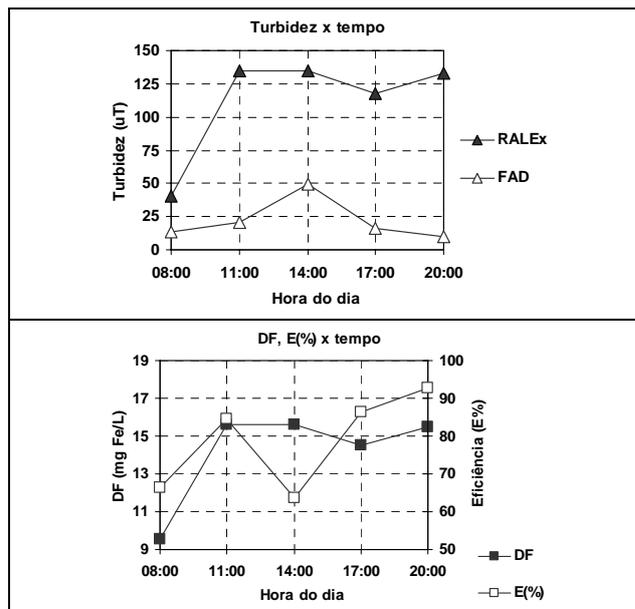


Figura 3f – Resultados obtidos na operação do sistema de Flotação por Ar Dissolvido em escala piloto com escoamento contínuo, conforme parâmetros do ensaio 6.

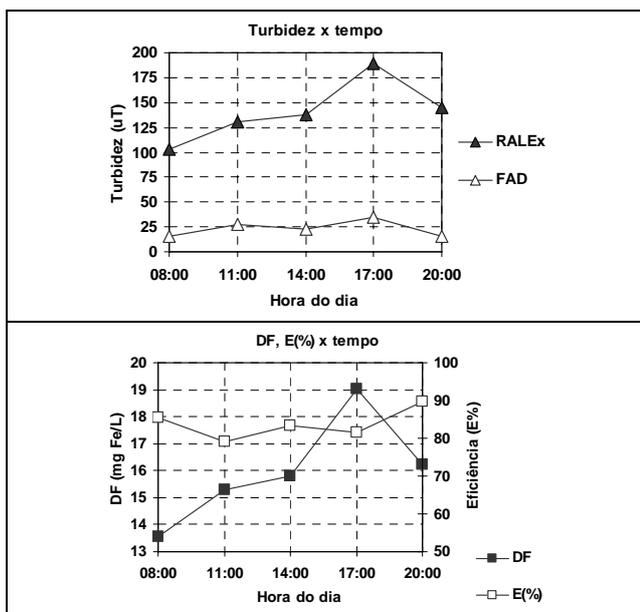


Figura 3e – Resultados obtidos na operação do sistema de Flotação por Ar Dissolvido em escala piloto com escoamento contínuo, conforme parâmetros do ensaio 5.

Em conformidade com constatações anteriores, houve variação ascendente da turbidez do RALEx durante o dia e consequentemente aumento da DF. Ressalta-se que para estes ensaios cuja taxa de aplicação superficial foi de 250 m³/m².dia houve queda média na eficiência de remoção em torno de 5% em relação a TAS de 200 m³/m².dia. Em termos da qualidade final do efluente em função dos padrões de lançamento, conforme Tabela 1 e Tabela 2, respectivamente, esta diferença é pouco significativa, ou seja, o sistema foi capaz de absorver este aumento da vazão do efluente a ser tratado.

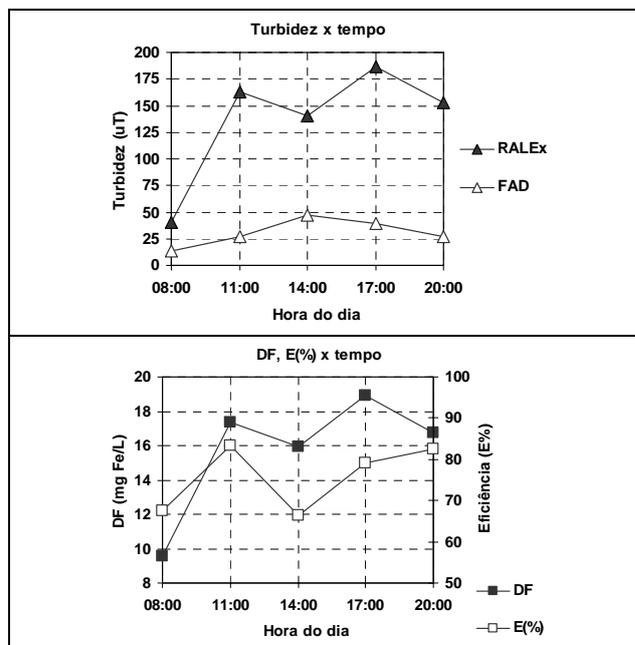


Figura 3g – Resultados obtidos na operação do sistema de Flotação por Ar Dissolvido conforme parâmetros do ensaio 7.

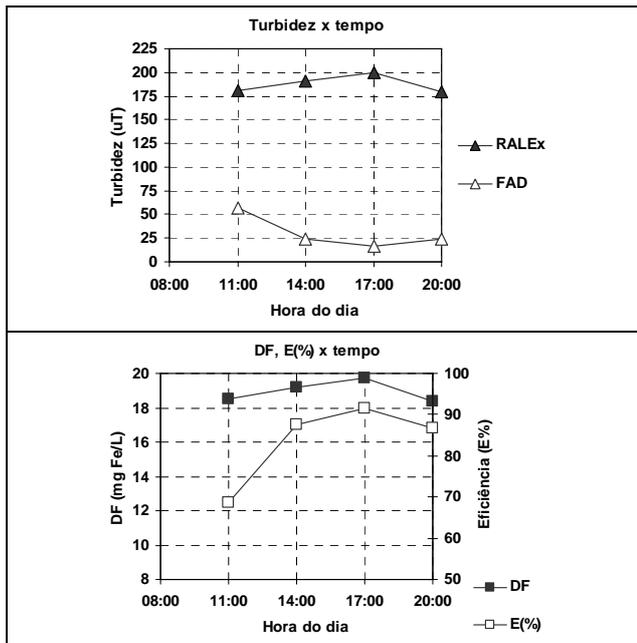


Figura 3h – Resultados obtidos na operação do sistema de Flotação por Ar Dissolvido em escala piloto com escoamento contínuo, conforme parâmetros do ensaio 8.

Nem sempre uma menor turbidez efluente do RALEx resultou em maior eficiência de remoção de turbidez na FAD, é o que pode ser observado na Figura 3h cuja maior eficiência de remoção foi verificada para as amostras coletadas às 17:00 horas. Para estas amostras, com turbidez do RALEx igual a 200 uT e turbidez da FAD igual a 20 uT, houve uma remoção de 90%, valor não igualado nem superado nas amostras coletadas em outros horários.

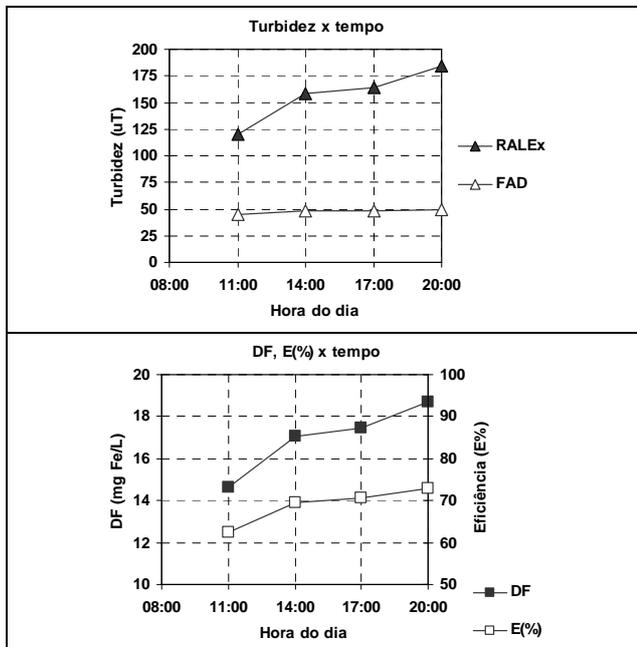


Figura 3i – Resultados obtidos na operação do sistema de Flotação por Ar Dissolvido em escala piloto com escoamento contínuo, conforme parâmetros do ensaio 9

A Figura 3i ilustra os resultados obtidos durante a operação da FAD com taxa de recirculação igual a 20%. O aumento da taxa de recirculação significa maior fornecimento de ar ao sistema (maior S^*), que pode ser positivo ao tratamento, no entanto, quanto maior, maior também a taxa de aplicação superficial no flotador. Além disso, valores exagerados de recirculação pressurizada pode resultar em aumento da taxa de aglutinação de microbolhas de ar, dependendo do tipo de bocal difusor adotado, o que resulta em perda de eficiência do processo FAD, conforme relata Penetra (2003). No caso deste experimento o aumento da taxa de recirculação parece ter causado efeito negativo ao tratamento, em detrimento do efeito positivo relativo ao aumento do valor de S^* , uma vez que a qualidade do efluente e a porcentagem de remoção de turbidez foram os piores observados.

Na Tabela 1 são mostrados valores médios de turbidez, Sólidos Suspensos Totais (SST), Demanda Química de Oxigênio Bruta (DQOB), Demanda Química de Oxigênio Filtrada (DQOF) e Fósforo na forma de fosfato ($P-PO_4^{3-}$), do Esgoto Bruto (EB) e dos efluentes do Ralex e da FAD, obtidos na operação do sistema de Flotação por Ar Dissolvido em escala piloto com escoamento contínuo. Pode-se verificar que em média, considerando-se todos os ensaios conduzidos, a unidade FAD operou com remoção acima de 70% para todos os parâmetros com exceção da DQOF que foi de 54%. Considerando-se o sistema como um todo houve remoção próxima de 90%.

Tabela 1 – Valores médios de turbidez, DQO e $P-PO_4^{3-}$, na operação do sistema de Flotação por Ar Dissolvido em escala piloto com escoamento contínuo, considerando-se média aritmética de todos os ensaios realizados

Amostra	Turbidez (uT)	SST (mg/L)	DQO _B (mg/L)	DQO _F (mg/L)	P-PO ₄ ³⁻ (mg/L)
EB	285	206	535	243	6,2
mínimo	213	165	402	192	5,1
máximo	403	270	679	276	8,0
desvio padrão	57	38	74	28	0,8
RALEx	130	76	233	91	5,9
mínimo	90	27	114	65	4,8
máximo	188	127	498	117	8,2
desvio padrão	29	31	109	19	1,1
FAD	25	22	59	42	0,8
mínimo	7	4	31	21	0,3
máximo	48	44	87	58	1,8
desvio padrão	11	11	16	13	0,5
E% (EB-RALEx)	54	63	56	63	5
E% (RALEx-FAD)	81	71	75	54	86
E% (EB-FAD)	91	89	89	83	87

A resolução CONAMA 430 (CONAMA, 2011) não apresenta valores máximos de lançamento de fósforo, no entanto, segundo esta resolução o órgão ambiental competente poderá definir padrões específicos para este parâmetro no caso de lançamento de efluentes em corpos receptores com registro histórico de floração de cianobactérias, em trechos onde ocorra a captação para abastecimento público.

A Tabela 2 apresenta as concentrações de SST, DQO e fósforo permitidas nos efluentes de alguns países do continente americano de acordo com suas respectivas legislações.

Tabela 2 – Legislações internacionais de padrões de lançamento de efluentes

País	Legislação	SST mg/L	DQO mg/L	P mg/L
Brasil	CONAMA 430/2011	-	120 (DBO)	-
Chile	D.S. nº 90 de 2000	80	-	10
Paraguai	Resolución 222/2002	-	150	4
Uruguai	Decreto 253/979 de 09/05/1979	150	-	5
Bolívia	Decreto Supremo nº 24176 de 1995	60 ⁽⁴⁾	250 ⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 300 ⁽⁴⁾⁽⁶⁾	-
Equador	Decreto 3516	100	250	10
Venezuela	Decreto nº 883 de fecha 11/10/1995	80	350	10
Colômbia	Decreto nº 1594 de 26/06/1984	-	-	-
México	NOM-001-ECOL-1996	75 ⁽³⁾ 150 ⁽⁴⁾	-	20(3) 30(4)

Fonte: adaptado de Veról & Volschan Jr. (2007)

Legenda: (1) médias mensais, (2) médias diárias, (3) lançamentos de processos mineraiis, (4) lançamentos de processos hidrocarbúrferos

Comparando-se os valores da Tabela 1 com os valores da Tabela 2 observa-se que o efluente da FAD apresentou valores sempre abaixo dos máximos permitidos pela legislação brasileira e pelas legislações internacionais.

4 – CONCLUSÕES

A partir dos ensaios de bancada, independente dos parâmetros fixos e variáveis estudados, a adoção de DCF da ordem de 65 mg/L (13,4 mg/L de Fe³⁺), foi capaz de promover redução em torno de 90% da turbidez por flotação. A obtenção da curva de DCF em função da turbidez do efluente do RALEX foi de extrema importância na operação da FAD. A aplicação de dosagem continuamente variada de coagulante tornou fácil o acompanhamento do sistema sem a necessidade de correções periódicas na DCF aplicada, além do alcance de bons resultados. Tais resultados foram semelhantes, em termos de eficiência de remoção, aos encontrados por Penetra (2003), entretanto com a vantagem da dosagem automatizada de coagulante sem o inconveniente de correções periódicas. A curva de DCF foi obtida a partir de dados que produziram remoção média de turbidez acima de 90%, entretanto, quando aplicadas ao sistema piloto de FAD tal patamar de eficiência não foi sempre alcançado. O aumento de escala e a mudança para operação em escoamento contínuo podem ser explicações razoáveis pela diferença de comportamento. De fato, pode-se perceber que tanto o aumento da taxa de aplicação superficial para 300 m³/m².dia e o aumento da recirculação para 20% ocasionaram decréscimo considerável no percentual de remoção. De maneira geral, foi possível concluir que a adoção da turbidez do efluente do reator anaeróbio como parâmetro de controle automático da dosagem de coagulante para a FAD conduziu a resultados muito satisfatórios em termos de remoção final dos parâmetros monitorados e garantiu bom controle operacional do sistema de pós-tratamento por flotação.

REFERÊNCIAS

ADIN, A. Particle characteristics: a key factor in effluent treatment and reuse. **Water Science and Technology**, v. 40, n. 4-5, p. 67-74, 1999.

BOLÍVIA. **Decreto Supremo 24.176**. Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica, 1995.

CHILE. **D. S. nº 90 de 30/05/2000**. Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociad las Descargas de Resíduos Líquidos a Águas Marinas y Continentales Superficiales. 2000.

COLÔMBIA. **Decreto 1.594**, 1984.

CONAMA. Resolução 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Ministério do Meio Ambiente (MMA)**, Brasil, 2011.

EDZWALD, J. K.; HAARHOOF, J. Dissolved air flotation for water clarification. **American Water Works Association**, 1st ed. Denver Colorado: Editora McGraw-Hill, 2011. v. 1, 352 p.

EQUADOR. **Decreto 3.516** – Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Água.

MÉXICO. **Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996**, 1996.

NICIURA, C. L. **Avaliação do Uso da Banda de Rodagem de Pneus Inservíveis Triturada como Suporte ao Desenvolvimento de Biofilmes em um Reator Anaeróbio de Leito Expansível**. São Carlos, 179 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2005.

PARAGUAI. **Resolución 222/02**, 2002.

PENETRA, R. G. **Flotação Aplicada ao Pós-tratamento do Efluente de Reator Anaeróbio de Leito Expandido Tratando Esgoto Sanitário**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.

REALI, M. A. P. **Concepção e Avaliação de um Sistema Compacto para Tratamento de Águas de Abastecimento utilizando o Processo de Flotação por Ar Dissolvido e Filtração com Taxa Declinante**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1991.

REALI, M. A. P. Proposição de um modelo teórico para o processo de flotação por ar dissolvido. **Anais... XXIV Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental**, Buenos Aires, Argentina. Anais Eletrônicos, Buenos Aires, AIDIS, 1994.

URUGUAI. **Decreto 253/979**. Norma para prevenir la contaminación ambiental mediante el control de las aguas, 1979.

VENEZUELA. **Decreto nº 883**, 1995.

VERÓL, A. P.; VOLSCHAN Jr., I. Inventário e análise de padrões de lançamento de esgotos sanitários: visão nacional e internacional. **XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, São Paulo, SP, 2007.

ZABEL, T. Flotation in water treatment. In: Ives, K. J. ed. **The Scientific Basis of Flotation. Proceedings of the NATO Advanced Science Institute on the scientific basis of flotation**. Cambridge, England, Martinus Nijhoff Publishers, The Hague, 349-377, 1984.