

## REMOÇÃO ELETROLÍTICA DE COR: SIM, NÃO OU TALVEZ?



Eduardo Cleto Pires

Escola de Engenharia de São Carlos, USP - São Carlos, SP - Brasil

Allan Springer

Vincent Hand

Miami University - Oxford, OH, Estados Unidos

### 1 - A questão ambiental

Cedo ou tarde as reações do público, às diversas questões ambientais, encontradas nos países industrializados, transferem-se para países em desenvolvimento e em processo de industrialização. Nos Estados Unidos, por exemplo, a indústria de papel, assim como outras indústrias consideradas poluentes, é vigiada atentamente pelo público. A indústria brasileira de papel não terá destino diverso. Cabe, pois, como introdução a este trabalho, pequenas considerações sobre o enfoque dado à questão do meio ambiente pela população de um país industrializado.

Nos Estados Unidos a preocupação do público com os compostos tóxicos é realçada, nos anos 90, pela situação da dioxina. Neste caso a ciência não foi a principal força motivadora e impulsora para o estudo e solução de um problema ambiental. Esta força foi a emoção! Em um clima no qual as emoções representam um fator importante, provavelmente seria sábio a indústria proteger-se, eliminando toda descarga de efluentes, de tal modo que qualquer percepção de um problema em potencial desapareceria. Talvez sejamos capazes de mostrar ao público que esta solução não é necessária, mas a experiência recente nos Estados Unidos com a questão da dioxina mostra que é difícil, senão impossível, que o público separe os fatos científicos objetivos da informação tendenciosa. A síndrome do "não no meu quintal" (conhecida, nos Estados Unidos, pelo acrônimo NIMBY - **Not In My Backyard**) é típica desta situação. Embora perceba-se a necessidade da criação de indústrias e expansão de empregos, poucos estão dispostos a receber as conseqüências desagradáveis que esta expansão pode trazer. Assim o público tem esperado, da indústria e dos órgãos oficiais ligados ao meio ambiente, uma proteção absoluta. A virtual paralisação da indústria nuclear é uma mostra destes efeitos.

A indústria papeleira sempre esteve sujeita a esta série de pressões devido aos danos que pode causar — e que no início de sua implantação causou —, ao meio ambiente. Por causa destas pressões têm uma longa história de desenvolvimento próprio de tecnologias de fabricação e tratamento de seus efluentes, que tornam menos impactantes as instalações modernas. Um problema que persiste, porém, sem que se tenha evoluído para uma solução econômica, é a remoção de cor e de compostos tóxicos dos efluentes do branqueamento de pasta kraft. Visando dar uma

---

"Trabalho apresentado no 26º Congresso Anual de Celulose e Papel da ABTCP, realizado em São Paulo-SP - Brasil, de 22 a 26 de novembro de 1993".

contribuição técnica e científica à procura de uma solução para o problema da cor e despejos tóxicos, respondendo à pergunta formulada no título deste trabalho, coloca-se aqui a possibilidade do tratamento eletrolítico destes compostos. Iniciando-se por uma breve revisão do problema da toxicidade e cor dos efluentes do branqueamento, bem como da remoção destes poluentes, prossegue-se com uma breve revisão histórica do método de tratamento eletrolítico. Finalizando apresenta-se a situação dos trabalhos, neste campo, nos departamentos de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos (SHS-EESC-USP) e Ciência e Engenharia do Papel da Miami University (PPS-MU) de Oxford, Ohio, nos Estados Unidos.

## 2 - Cor, toxicidade e suas conseqüências

Na Figura 1 compara-se a cor produzida em uma indústria integrada de polpa kraft, funcionando com um projeto dos anos 70 com aquela encontrada em uma indústria construída nos anos 80. No primeiro caso empregava-se uma seqüência CEDED para o branqueamento, enquanto no segundo uma seqüência OC<sub>d</sub>ED. Apesar da nova instalação lançar, no total, muito menos material colorido, a quantidade ainda é suficiente para representar um problema significativo. Este material colorido é derivado da lignina e todas as áreas da indústria contribuem com cor, sendo o branqueamento a principal fonte. Uma análise similar das origens da toxicidade não é, ainda, prontamente disponível, mas há consenso que o branqueamento é a maior fonte de tóxicos seguido pela polpação e o pátio de madeira, que têm contribuição bem menor.

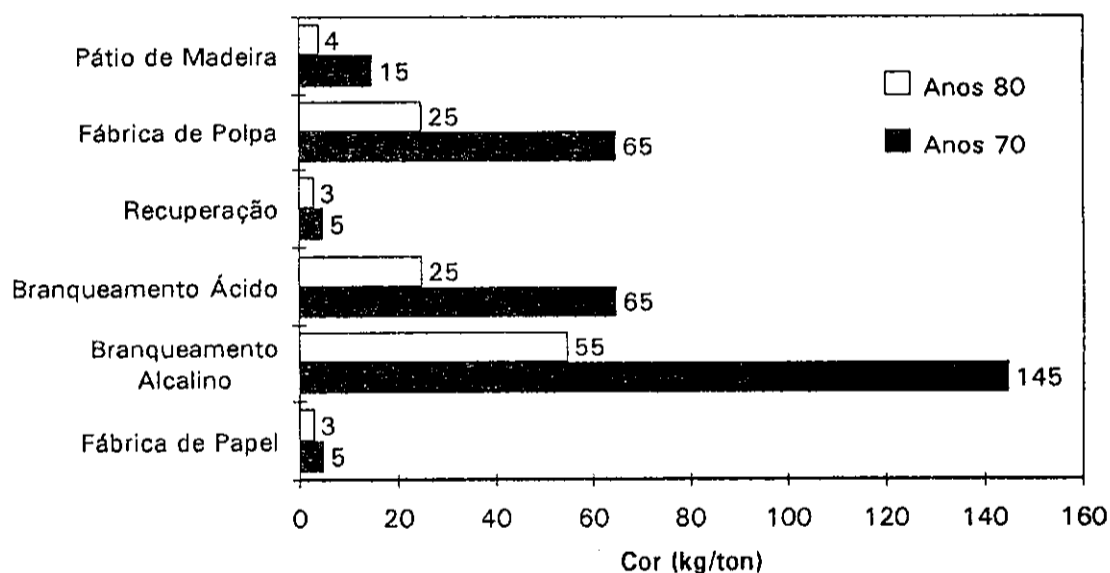


Figura 1 - Fontes e quantidade de cor em uma fábrica integrada de pasta kraft.

É importante fazer uma distinção entre o problema da cor e o problema da toxicidade. A cor está associada, principalmente, com moléculas de alto peso molecular (maior que 500) enquanto que a toxicidade associa-se com compostos de baixo peso molecular. Os compostos com peso molecular abaixo de 500 são responsáveis por 80 a 90% dos efeitos mutagênicos na fauna e flora dos corpos receptores. Os compostos com alto peso molecular não são absorvidos facilmente por organismos aquáticos e, portanto, a ação de compostos coloridos sobre estes organismos é indireta, SOTELAND, CARBERG & HONGSLO (1984).

Uma grande parte do problema da toxicidade está associada com compostos organo-clorados e a quantidade total de cloro orgânico (TOCI) encontrado em efluentes tem se mostrado diretamente proporcional à quantidade de cloro e dióxido de cloro usado no branqueamento, PIRES (1990).

Os materiais tóxicos encontrados nos efluentes da fábrica de polpa branqueada podem matar ou danificar a vida aquática; possuindo também o potencial de bioacumulação, podem prejudicar organismos mais elevados na cadeia alimentar, inclusive o homem. A Tabela I é uma lista parcial de compostos potencialmente tóxicos que são deixados após o tratamento biológico dos efluentes. Aparecem nesta tabela apenas os compostos representativos mais importantes, uma vez que foram identificados 313 compostos clorados em efluentes não tratados de indústria de pasta kraft branqueada. A maior parte destes materiais são compostos clorados, de tal forma que o sistema usado para os mineralizar deve ser suficientemente potente não apenas para converter o carbono em CO<sub>2</sub>, mas também para quebrar as ligações carbono-cloro.

Tabela I - Compostos orgânicos clorados representativos, presentes em efluentes após o tratamento biológico, de indústria de pasta kraft branqueada.

Composto	Concentração Média (mg/l)	Faixa de Concentração (mg/l)
Clorofórmio	24	4-112
2,4-Diclorofenol	6	2-9
2,4,6-Triclorofenol	8	3-14
Pentaclorofenol	10	2-26
Tricloroguaiacol	20	2-42
Tetracloroguaiacol	12	1-12
Ácido 12-Clorodehidroabiético	6	2-9
Ácido 14-Clorodehidroabiético	17	2-31
Ácido diclorodehidroabiético	39	3-110

A cor é um poluente mais sutil. Reduzindo a transparência da água, reduz a produtividade da comunidade aquática dependente da luz, podendo ocorrer em consequência, queda do oxigênio dissolvido, o que irá diminuir a população de peixes. Os corpos coloridos tendem a formar complexos com metais pesados, podendo tornar-se tóxicos apenas após o despejo nos corpos receptores dos efluentes. Desta forma nem sempre a toxicidade de alguns dos compostos coloridos é detectada em ensaios rotineiros de laboratório. O peso molecular dos compostos coloridos é alto e estes exercem demanda bioquímica de oxigênio (DBO) por longos períodos, chegando a 100 dias. Por fim, a cor tem sido associada com crescimento exagerado de algas ("bloom") que causam transtornos e intensificam os problemas estéticos associados à cor.

### 3 - Processos para remoção de cor e toxicidade

A cor e toxicidade são problemas antigos na indústria papelreira, sendo novo apenas o nível de tratamento que será necessário no futuro. Toda uma gama de técnicas para remoção de cor já foram testadas e muitas foram avaliadas em escala

real. Entre os processos já desenvolvidos ou em avaliação encontram-se: tratamento com cal, com sulfato de alumínio, adsorção em resinas, adsorção em carvão ativado, ultra-filtração, osmose reversa e coagulação com polímeros. Até 1988, o único método em operação, nos Estados Unidos, era um sistema de coagulação-flotação com polímero, instalado em uma fábrica de pasta kraft não branqueada, JAIN (1988a). Do ponto de vista técnico a maioria dos processos é eficiente, mas, até o momento, nenhum apresentou viabilidade econômica. Quando comparados entre si todos apresentam vantagens e desvantagens, tornando difícil decidir-se, em definitivo, por um ou outro método.

Sendo o branqueamento a maior fonte de cor e toxicidade, reduções mesmo que relativamente pequenas, nesta fase da produção da polpa são sempre significativas no conjunto. Duas correntes de pesquisa, não excludentes entre si, têm sido empregadas na procura de uma solução para esta área específica. Uma corrente preocupa-se com o processo de branqueamento em si. Com a substituição de reagentes químicos, alterações na seqüência de aplicação e outras variações, grandes melhoras já foram alcançadas, como é ilustrado na Figura 1, anteriormente comentada. Uma relação extensa de soluções encontradas por meio de modificações internas no branqueamento é exposta por JAIN, 1988b. Outra corrente procura tratar os efluentes permitindo o reuso da água. A reciclagem interna nos processos de fabricação de polpa e papel já é comum a muito tempo. O princípio da reciclagem consiste em proporcionar o reuso da água, em ciclos o mais curto possíveis, maximizando a conservação de energia e massa associada à água reciclada, SPRINGER (1986). O fato do despejo do branqueamento conter cor e toxicidade em alta concentração o faz candidato para um tratamento especial. Observe-se que nenhuma das soluções até o momento apresentadas resolve completamente o problema. No futuro uma solução total será necessária e a recirculação completa dos efluentes industriais talvez seja a única forma de solucionar o problema.

Um processo que apresenta potencial de emprego tanto como parte do processo interno ("in-plant") quanto como um tratamento a ser aplicado como polimento, ao final do tratamento biológico ("end-of-pipe"), permitindo maior taxa de reciclagem da água, é o tratamento eletrolítico, também conhecido como eletrocoagulação. Este tipo de tratamento consiste na aplicação de uma corrente elétrica através do meio aquoso, eletrólito, causando a dissolução de um eletrodo metálico de sacrifício. Os íons metálicos, a corrente elétrica e a formação de bolhas gasosas pela decomposição do eletrólito, provocam reações físico-químicas que permitem separar — por sedimentação ou flotação, dependendo das circunstâncias —, o material colorido e outros poluentes dissolvidos e dispersos nas águas residuárias.

#### **4 - Breve revisão histórica sobre o processo eletrolítico para tratamento das águas residuárias**

O processo eletrolítico para tratamento de esgotos tem uma longa história, que inicia-se nas últimas décadas do século XIX, com a aplicação generalizada da eletricidade, uma forma de energia que ainda provocava muita curiosidade, em todos os campos possíveis. O emprego generalizado do tratamento eletrolítico de esgotos é até mesmo anterior ao uso dos sistemas biológicos. Uma excelente revisão histórica é encontrada nos trabalhos de MARSON (1965) e WIENDL (1985), apresentado-se aqui apenas alguns eventos marcantes, resumidos no Quadro I.

Quadro I - Cronologia do processo eletrolítico no tratamento de esgotos sanitários

Ano	Evento
1887	Patente para Eugene Hermite (França e Inglaterra) para processo de tratamento de esgoto misturado a água do mar.
1889	William Webster (Processo Webster). Patente e construção de uma estação de tratamento de esgoto em Crossness, suburbio de Londres.
1908	Processo Webster é usado em Santa Mônica, Califórnia (população servida: 34.000 pessoas).
1909	Patente de J.T.Harris para purificação com eletrodo de ferro e alumínio.
1911	C.P.Landreth patenteia e constroe diversas estações de tratamento de esgotos em Oklahoma City, Oklahoma.
1918	A Divisão de Engenharia da Pensilvânia, o Departamento de Saúde e o Comitê do Instituto Franklin testam o processo de Landreth, demonstrando o alto grau de oxidação de matéria orgânica e remoção de bactérias.
1932	Usa-se o processo Webster na Alemanha, no rio Niers e na estação de Rheidt (60% de remoção da DBO).
Anos 30	Sistemas eletrolíticos são abandonados em favor de estações biológicas de tratamento.
1962	Estação piloto em Nápoles, Itália, atinge 66% de remoção de DBO.
1964	Estudo de Foyn em Oslo, Noruega, para remoção de nutrientes de esgoto sanitário.
1965	Avaliação de Miller & Knipe para o U.S. Department of Health, Education and Welfare.
1969	Estação piloto construída pela John Brown Builders em Cosham, Hampshire, Inglaterra.
1972	Patente para C.E.Smith. Aplicação do sistema consegue 95% de remoção da DQO, 43% de sólidos totais, 96% de DBO, 100% de fosfato e coliformes.
Anos 90	Diversas aplicações no estado de São Paulo projetadas por Wiendl e Bezerril

Segundo MARSON (1965), dois dos primeiros trabalhos de que se têm notícia sobre o tratamento eletrolítico de esgotos sanitários, são as patentes requeridas na Inglaterra e na França em 1887 por Eugene Hermite. No processo "Hermite" tratavam-se esgotos misturados à água do mar. Este processo foi sendo aperfeiçoado e usado no tratamento de esgotos em diversas cidades americanas e européias, até que, nos anos trinta, o processo é abandonado em favor de processos

biológicos de custo mais baixo. Nos anos 60 há um novo surto de interesse pelo processo, ainda para o tratamento de esgotos, e diversos projetos e trabalhos de pesquisa são realizados e divulgados. De forma esparsa sempre foram publicados trabalhos sobre este método, tanto para uso no tratamento de esgoto doméstico quanto no tratamento de águas residuárias industriais.

Na indústria de papel e celulose o primeiro trabalho recente e de importância foi publicado por HERER & WOODARD (1976), quando demonstraram a exequibilidade da remoção de cor e materiais carbonáceos, além da adequação do processo eletrolítico à adição de íons de alumínio aos efluentes de instalações de branqueamento de papel. Seus resultados experimentais indicaram que a cor e os materiais carbonáceos foram removidos na célula eletrolítica por coagulação química. Em 1978 OEHR estudou este processo, aplicando-o ao efluente da extração cáustica da lignina no branqueamento. Este pesquisador aplicou o tratamento ao efluente puro e ao efluente diluído com água do mar — para aumentar a condutividade elétrica —, utilizando ânodos de dióxido de chumbo e cátodos de aço inoxidável. Oehr concluiu que o aumento da condutividade, no caso com aumento da concentração de cloretos, diminui a potência necessária para um mesmo percentual de remoção de cor. Ainda, menores densidades de corrente também aumentam a eficiência do processo. Das GUPTA (1979) por sua vez, aplicando eletrodos de fibra de carbono, demonstrou que a matéria orgânica é degradada por eletro-oxidação direta e indireta. Com seu processo conseguiu uma remoção de 90% para a cor, 60% para a DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) e DQO (Demanda Química de Oxigênio) além de reduzir a toxicidade do efluente, conforme mostrado na Tabela II. NASSAR e colaboradores (1983) estudaram, para um conjunto chumbo/aço inoxidável, a influência da agitação da solução sobre a eficiência de remoção. Esta agitação diminui a polarização da célula, pois ocorre diminuição da resistência provocada pela barreira de bolhas de gás e aumenta a transferência de massa no espaço entre eletrodos. Pelos gráficos publicados conclui-se que foi atingida cerca de 85% de eficiência na remoção da cor.

Tabela II - Toxicidade antes e após o tratamento eletrolítico, Das GUPTA (1979)

Parâmetros	Antes do tratamento	Após o tratamento	Remoção (%)
Toxicidade para truta	100% de mortalidade em 22 horas para uma solução a 60%	Zero de mortalidade em 92 horas para uma solução a 60%	
Cor	10.500 UPC	300 UPC	97
DQO	1.800 mg/l	500 mg/l	72

##### 5 - As pesquisas sobre o tratamento eletrolítico nos departamentos de Hidráulica e Saneamento (EESC-USP) e Ciências e Engenharia do Papel (MU)

Apesar de haver uma bibliografia relativamente extensa sobre o processo eletrolítico, incluindo-se aplicações específicas na indústria de papel e celulose, ainda não há material suficiente para a formulação de recomendações para projeto e aplicação do método. Observa-se também que uma parte considerável dos resultados da

literatura existente foi divulgada por fabricantes de equipamento, que por compreensível razão deixam de divulgar detalhes do projeto ou aspectos negativos de menor importância. Adicionando-se a estes problemas, verifica-se que os trabalhos encontrados referem-se a efluentes das mais diversas origens, fato que dificulta a comparação entre os resultados. Com o objetivo de superar estas e outras dificuldades, compreendendo-se os fenômenos envolvidos, para que se obtenha ao final uma série de recomendações de projeto e aplicação, se este for o caso, em um esforço conjunto, o Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS), no Brasil, e o Departamento de Ciência e Engenharia do Papel (PPS), nos Estados Unidos, têm desenvolvido uma série de pesquisas sobre processo eletrolítico. Eventualmente, se esta linha mostrar-se promissora, será avaliado o uso do tratamento eletrolítico em combinação com outros processos, de forma a que eles se complementem.

A revisão dos trabalhos publicados mostrou que em alguns deles não foram apresentados métodos adequados para estudo da viabilidade econômica do processo. Em outros as descrições dos procedimentos experimentais são esparsas. Assim, na primeira etapa de nosso trabalho desenvolveram-se alguns procedimentos experimentais e de análise que estão permitindo um avanço seguro no entendimento da questão. Nos dois laboratórios a pesquisa iniciou-se com o uso de efluentes sintéticos, preparados à base de ligninas solúveis encontradas no mercado.

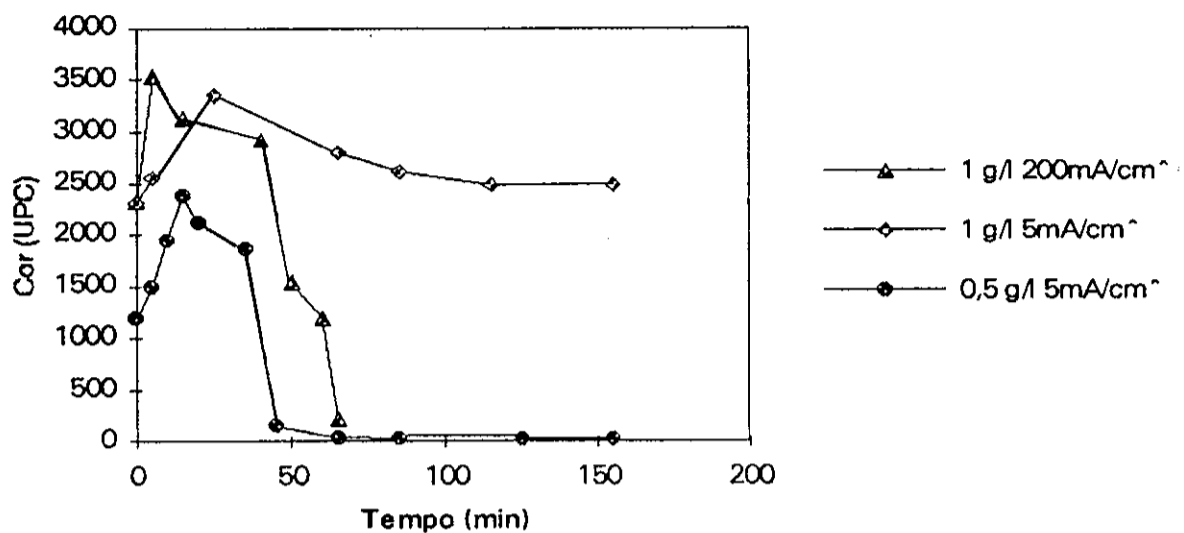
Para testar um número maior de configurações básicas para os reatores, no PPS utiliza-se um reator com recirculação do efluente, enquanto que no SHS iniciou-se a pesquisa empregando um reator descontínuo, do tipo vaso com agitação, passando-se em seguida a um reator contínuo de mistura completa. Os resultados do ponto de vista qualitativo foram os mesmos nos dois laboratórios, indicando que, em termos de eficiência de remoção, o processo não é sensível ao tipo de reator, Figura 2. Observou-se também boa reprodução nos ensaios. Os resultados completos dos primeiros trabalhos foram publicados por LEITÃO e PIRES (1991) e SPRINGER & HAND (1992).

O PPS solicitou, à Electro-Pure Systems, uma avaliação preliminar da tratabilidade de uma amostra de efluente de uma indústria de pasta kraft branqueada. O equipamento empregado consiste de uma célula eletrolítica, funcionando com corrente alternada e eletrodos de alumínio. De acordo com o fabricante o equipamento funciona de forma similar àquela proporcionada pela simples dissolução de alumínio em solução. Este mecanismo também se observa em equipamentos que funcionam com corrente contínua. O processo da Electro-Pure Systems foi capaz de atingir 91% de remoção de cor após o ajuste do pH a 5,3. Foram necessários de dois a três minutos de tratamento a 15Vac e 20A. Esta corrente é consideravelmente maior que a empregada em sistemas com corrente contínua. O consumo total de energia, porém, parece ser da mesma ordem de grandeza.

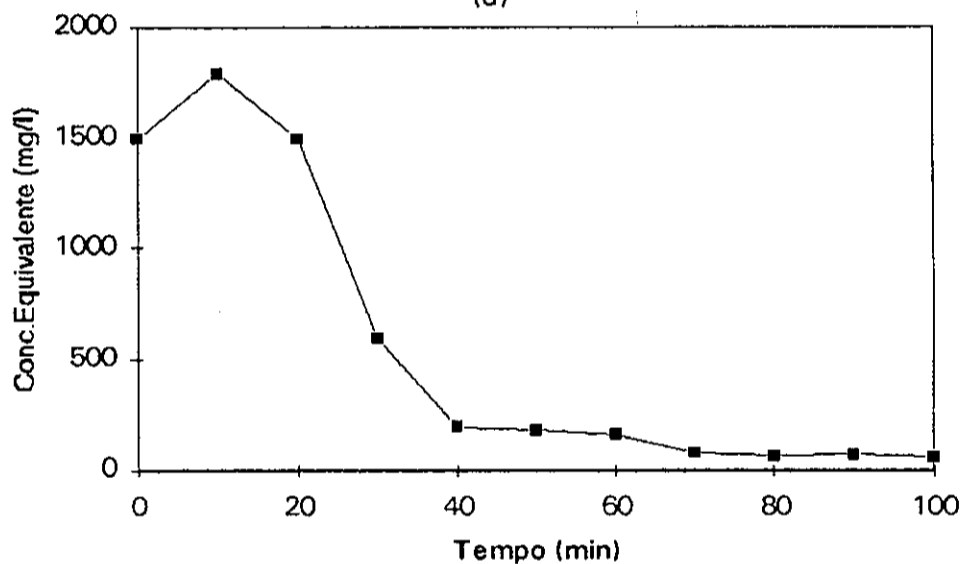
Atualmente encontra-se em ensaio um reator de laboratório desenvolvido pela ANDCO Environmental Process Inc.. Este equipamento é usado, normalmente, na avaliação da tratabilidade e levantamento de parâmetros operacionais para o tratamento de águas residuárias de indústrias têxteis e recuperação de metais pesados em efluentes de galvanoplastia. Para sua avaliação têm-se empregado um efluente sintético.

Enquanto que no PPS avalia-se a aplicação de equipamentos disponíveis no mercado aos efluentes da indústria de papel, no SHS procura-se desenvolver um sistema de tratamento independente daqueles comercializados. Para isso projetou-se um protótipo baseado em uma fonte estabilizada de corrente contínua, um reator

contínuo de mistura completa e um reator de batelada, também agitado. Alguns aspectos econômicos já são estudados, embora o equipamento seja de bancada e não permita extrapolação confiável dos resultados. Como parâmetro de comparação entre séries experimentais usa-se o número de eficiência, proposto por LEITÃO & PIRES (1991) e a massa de íons de alumínio necessários para a coagulação da cor utilizando apenas o sulfato de alumínio, conforme descrito por GUAGLIANONI (1993).



(a)



(b)

Figura 2 - Comparação entre os resultados obtidos nos ensaios realizados no SHS e no PPS. (a) Ensaios realizados no SHS para avaliação da remoção de cor em função do tempo de tratamento com eletrodos de aço carbono, diferentes densidades de corrente e concentrações iniciais de lignina solúvel. (b) Variação da concentração aparente de indulina durante oxidação eletroquímica; ensaio realizado no PPS. Fontes: LEITÃO & PIRES (1991) e SPRINGER & HAND (1992).

O número de eficiência foi definido como uma relação envolvendo a energia elétrica consumida, o tempo de detenção e o custo dos eletrodos:



$$N = \frac{1}{MCT \int_0^T VI dt}$$

onde N - número de eficiência [1/(\$.min.Wh)];  
M - peso consumido de eletrodo para uma eficiência de remoção h [kg];  
C - custo dos eletrodos [\$ /kg];  
T - tempo de detenção necessário para uma eficiência de remoção h [min];  
V - tensão aplicada [V];  
I - corrente aplicada [A].

Embora não represente todas as variáveis envolvidas no custo, o número de eficiência tem permitido a comparação entre resultados, para uma mesma situação econômica. Será necessário um aperfeiçoamento deste parâmetro para que possa ser usado como um coeficiente de qualidade que permita comparações entre os mais diversos sistemas e condições econômicas. Nos ensaios realizados na primeira etapa das pesquisas, o uso do número de eficiência confirmou a percepção que baixas densidades de corrente, em geral, são mais eficientes. Foi encontrado um ponto de ótimo funcionamento em torno de 2,5mA/cm<sup>2</sup>. Este ponto de ótimo deve variar de efluente a efluente, porém.

Um aspecto surpreendente nos resultados das pesquisas realizadas no SHS foi a remoção da demanda química de oxigênio (DQO). Na Tabela III apresenta-se um resumo de resultados obtidos com efluentes das fases de extração cáustica e extração oxidativa. Verificou-se que mesmo quando a remoção da cor foi baixa, até mesmo insignificante, a remoção da DQO nunca foi inferior a 80%.

Tabela III - Resumo dos resultados obtidos para efluentes das fases de extração cáustica e extração oxidativa, aplicando-se eletrodos de aço carbono em reator de escoamento contínuo.

Densidade de corrente (mA/cm <sup>2</sup> )	Tempo total de detenção (h)	Remoção (%)	
		Cor	DQO
20	1,33	5,8	82,0
30		56,6	93,2
40		76,2	88,1
20	2,25	13,8	89,1
30		79,6	90,6
40		85,0	91,0
30	1,84	65,5	85,3
40		75,8	88,6

Com relação à questão econômica, devido ao porte dos experimentos realizados até o momento, não foi possível um avanço significativo. Pode-se adiantar, no entanto, que para os efluentes ensaiados o processo eletrolítico resultou em menor consumo de fons alumínio quando comparado com a simples coagulação com sulfato de alumínio.

## 6 - Estágio de desenvolvimento do processo eletrolítico.

Os resultados obtidos até o momento e a revisão da literatura indicam que o tratamento eletrolítico de efluentes da indústria de papel é tecnicamente viável, sendo razoável esperar-se remoção de cor e DQO superiores a 90% após otimização dos parâmetros operacionais.

A experiência também demonstrou que o equipamento básico é fácil de ser projetado e sua operação é simples. Para facilitar ainda mais a operação, pode-se aplicar o controle automático do processo de tratamento, uma vez que a maioria dos parâmetros operacionais e de desempenho são mensuráveis em tempo real e "on-line". Este tipo de controle, aliado ao próprio mecanismo de atuação do processo eletrolítico, o torna extremamente eficaz no tratamento de efluentes com flutuações abruptas e cargas de choque.

O custo correspondente ao consumo de energia elétrica é considerável no processo eletrolítico. Este consumo, porém, pode ser diminuído significativamente se forem tomados alguns cuidados de operação e projeto do equipamento. Mantida uma corrente constante, o consumo de energia será tanto maior quanto maior for a resistividade elétrica total do conjunto eletrodo/eletrólito. No SHS foi testado um sistema que, proporcionando a auto-limpeza do eletrodo, diminui a tensão e conseqüentemente o consumo de energia. Alguns ensaios preliminares indicaram que o consumo pode ser reduzido em mais de 60% com esta providência.

Com relação ao custo das instalações, deve-se lembrar que o processo eletrolítico é muito rápido. Nos ensaios realizados nunca foi necessário tempo de detenção total superior a três horas, podendo, quando bem ajustado, ser reduzido a alguns minutos, ocupando, pois, um volume muito pequeno quando comparado com tratamentos biológicos convencionais.

Algumas decisões importantes ainda devem ser tomadas, uma das principais sendo a localização do tratamento no fluxograma da indústria. A sua versatilidade permite que possa ser empregado como parte do processo de fabricação, como pré-tratamento ou ainda no polimento, antes da disposição final das águas residuárias. Provavelmente o uso a ser dado será definido pelo custo total do processo.

Na análise do custo algumas situações podem ser consideradas. Uma é a substituição total dos processos biológicos ou físico-químicos, em uso, pelo tratamento eletrolítico. Neste caso dificilmente o processo eletrolítico será competitivo no futuro próximo. Uma situação, mais realista para o momento, é o emprego do tratamento eletrolítico como auxiliar, apenas para alguns efluentes específicos, como o do branqueamento. Neste caso há grande chance do processo tornar-se competitivo. Uma resposta melhor, talvez definitiva, apenas será possível após a operação de uma instalação piloto, nas diversas situações possíveis. Deverá também ser considerada a qualidade necessária para os efluentes no futuro.

## 7 - Conclusão

Este trabalho nos mostra que a resposta para a pergunta colocada em seu título é ainda "talvez". Algum progresso já foi alcançado, mas ainda há um longo caminho a ser percorrido e neste percurso outros processos mais eficientes poderão ser descobertos. Devemos todos, pesquisadores e dirigentes, na academia e na indústria, ter uma visão de longo prazo. Não nos resta dúvida que o problema ambiental será cada

vez mais complexo e que o legislador irá responder em consonância com a maior ou menor gravidade que o problema adquirir, com a maior ou menor pressão que receber da sociedade. Sabemos hoje que o meio ambiente não é capaz de auto-regeneração infinita, assim os limites de lançamento serão cada vez mais restritos. Em alguns centros altamente industrializados o custo do tratamento já está deixando de ser uma questão, os lançamentos poluentes simplesmente têm que ser eliminados. O tratamento eletroquímico talvez seja uma forma de alcançarmos os limites impostos no futuro.

O pleno desenvolvimento do processo eletrolítico, ou outro que derive de pesquisas nesta área, representa um caso típico onde se faz necessária uma colaboração estreita entre a indústria e a universidade. Na maioria dos casos as indústrias não podem dispor de uma equipe de alto nível dedicando-se quase que exclusivamente a uma atividade incerta como a pesquisa em um campo novo. Este, porém, é um dos objetivos da universidade. Seus pesquisadores dispõem do tempo e de muitos dos recursos materiais para este trabalho. O pesquisador universitário quer entender o processo em detalhes. Por outro lado, a universidade precisa da matéria prima para este trabalho, o efluente, e das informações precisas sobre as condições em que estes efluentes são produzidos. Apenas a indústria pode fornecer este material. Também, a escala em que os ensaios podem ser realizados é diferente. Na universidade podem ser feitos ensaios bem controlados em escala de bancada, análises químicas precisas e extensas avaliações de bio-toxicidade dos efluentes tratados. Novamente, apenas na indústria podem ser feitos testes em escala piloto, nas condições normais de fábrica. E apenas a empresa tem os recursos financeiros para a construção e operação de tal instalação. Assim, existindo uma colaboração estreita entre estas duas instituições poderemos chegar rapidamente a um resultado satisfatório e, quem sabe, de baixo custo.

**Agradecimentos:** Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, pelo financiamento das pesquisas que deram origem a este trabalho (Proc. nº 91/4713-0); ao CNPq pela bolsa de pesquisa do Prof. Eduardo C. Pires; à RIPASA S.A. Celulose e Papel pelo fornecimento de efluentes; à Electro-Pure Systems e Andco Environmental Process pelo empréstimo de equipamentos e realização de ensaios; aos alunos de mestrado do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, Laíze G. Guaglianoni, Renato C. Leitão e Jean Rosa pelo trabalho de laboratório.

#### Referências Bibliográficas

- Das GUPTA, S. A novel Electrochemical Process for Effluent Treatment in Kraft mill Effluents. *Pulp & Paper Canada*, v.80, n.2, 68-70, Apr., 1979.
- GUAGLIANONI, Laíze G., **Remoção de cor por processo eletrolítico em águas residuárias contendo lignina**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos - USP, fev. 1993.
- HERER, D.O & WOODARD, F.E., Electrolytic coagulation of lignin from kraft mill bleach plant wastewater. *Tappi*, v.59, n.1, p.134-36, Jan., 1976.
- JAIN, A.K., Closed cycle technology report. **NCASI**, Oct. 1988a.
- JAIN, A.K., In plant technology report. **NCASI**, Oct. 1988b.
- LEITÃO, R.C. & PIRES, E.C., Avaliação do processo eletrolítico para a remoção de cor causada pela lignina. In: **Anais do 16º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Goiânia, ABES, v.2, tomo IV, p.476-92, 1991.

- MARSON, H.W., Electrolytic sewage treatment. **The Engineer**, n.2, p.591-92, Apr., 1965.
- NASSAR, M. M.; FADALI, O. A. & SEDAHMED, G. H. Decolorization of Pulp Mill Bleaching Effluents by Electrochemical Oxidation. **Pulp & Paper Canada**, v.84, n.12, 95-8, Dec., 1983
- OEHR, K., Electrochemical decolorization of kraft mill effluents. **Journal of the Water Pollution Control Federation**, v.50, n.2, p.286-89, Feb., 1978
- PIRES, Eduardo Cleto, Pollution abatement in the bleaching plant through process modifications - state of the art. In: **Water Resources Management and Protection in Tropical Climate - Selected Papers from the First International Symposium**, Havana, February 8-12, 1988, publicado em 1990.
- SOTELAND, N., CARLBERG, G.E. & HONGSLO, Effluents de blanchiment - étude de quelques facteurs modifiant l'impact sur l'environnement. **Revue. A.T.I.P.**, v.38, n.9, p.505-10. nov., 1984.
- SPRINGER, A.M. & HAND, V.C. An analysis of the potential of photochemical techniques for decolorization of bleached kraft mill effluent. **TAPPI Environmental Conference, Proceedings**, Apr.12-15, 1992.
- SPRINGER, A.M., **Industrial environmental control: Pulp and paper industry**. John Wiley, 1986
- WIENDL, W.G., Processos eletrolíticos para depuração de esgotos - Uma revisão secular. **Revista DAE**, v.45, n.140, p.50-4, mar., 1985.