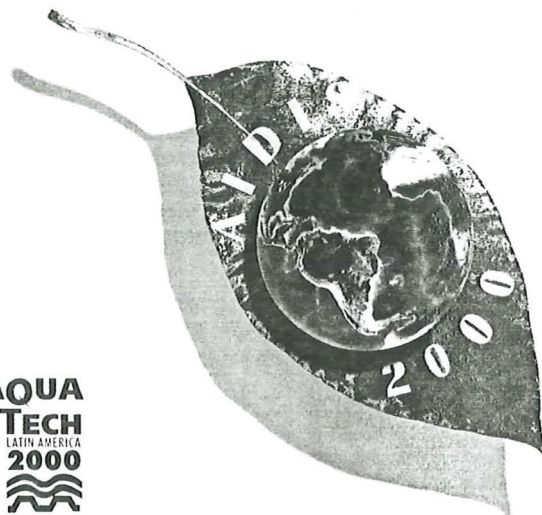


- Tema I** - Alcantarillado Sanitario (Aguas Negras o Servidas)/Tratamiento de Efluentes Domésticos e Industriales/Reuso
- Tema II** - Suministro/Tratamiento del Agua
- Tema III** - Residuos Sólidos
- Tema IV** - Materiales/Equipos/Instrumentación
- Tema V** - Calidad, Conservación y Gerenciamiento de Recursos Hídricos
- Tema VI** - Educación, Gestión, Manejo y Control Ambiental
- Tema VII** - Salud Pública/Control de Vectores
- Tema VIII** - Recursos Humanos/Enseñanza y Adiestramiento
- Tema IX** - Planificación/Legislación/Administración y Gerenciamiento del Sector
- Tema X** - Irrigación/Drenaje Urbano/Control de la Erosión
- Tema XI** - Otros

XXVII CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL

Las Américas y la Acción por el Medio Ambiente en el Milenio



Apoyo Institucional



SECRETARIA DE RECURSOS HIDRICOS
MINISTERIO DO MEIO AMBIENTE

GOVERNO FEDERAL



se a





**I-062 - TRATAMENTO DE EFLUENTES DE FÁBRICA DE PAPEL POR
PROCESSOS FÍSICO-QUÍMICOS EMPREGANDO FLOTAÇÃO POR AR
DISSOLVIDO E OZÔNIO**

Ricardo Nagamine Costanzi

Engenheiro Civil. Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo - EESC-USP. Professor da UNIOESTE, Cascavel - PR.

Luiz Antonio Daniel⁽¹⁾

Engenheiro Civil. Mestre e Doutor em Hidráulica e Saneamento pela EESC-USP. Professor Doutor do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC-USP. Área de pesquisa em pós-tratamento de esgoto por oxidação química, minimização e reuso de efluentes industriais e desinfecção de água e esgoto.

Marco Antonio Penalva Reali

Engenheiro Civil. Mestre e Doutor em Hidráulica e Saneamento pela EESC-USP. Professor Doutor do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC-USP. Área de pesquisa em pós-tratamento de esgoto por processos físico-químicos, tratamento de água e esgoto por flotação com ar dissolvido.

FOTOGRAFIA
NÃO
DISPONÍVEL

Endereço⁽¹⁾: Av. Trabalhador São-Carlense, 400 - São Carlos - SP - CEP:13566-490 - Brasil - Tel. (16) 273-9515 - Fax (16) 273-9550 - e-mail: ldaniel@sc.usp.br

RESUMO

Neste trabalho são apresentados os resultados de pesquisa sobre a tratabilidade do efluente de fábrica de papel para imprimir por processos físico-químicos visando o reuso de água. Foram empregados os processos de oxidação do efluente com ozônio, flotação seguida de ozonização e ozonização seguida de flotação. De maneira geral os processos de tratamento estudados produziram efluentes com turbidez, cor aparente, DQO e SST baixas, o que indica a possibilidade de reuso indireto. O efluente flotado, no que se refere à turbidez e cor aparente, apresentou qualidade semelhante à água produzida pela ETA da indústria.

PALAVRAS-CHAVE: Fábrica de Papel, Flotação, Ozônio, Efluentes Industriais.

INTRODUÇÃO

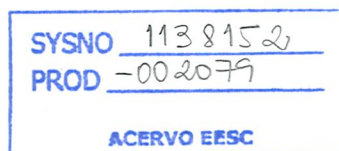
A limitação dos recursos naturais, e em particular dos recursos hídricos, exige que o controle de poluição não seja feito somente no ponto de lançamento. O emprego de tecnologias de tratamento de efluentes, mesmo as mais avançadas, pode não ser a melhor solução para o controle da qualidade ambiental. Essas próprias tecnologias podem, dependendo dos resíduos tratados, ser fonte de poluição. A concentração substâncias tóxicas, antes diluídas e posteriormente removidas da fase líquida em forma de lodo, torna-se tão ou mais problemática do que o efluente não tratado.

A proposta de minimização de efluentes pelo controle de desperdício, reciclagem, recirculação e reuso após tratamento parece ser a mais aceita atualmente.

É nessa linha de atuação que a presente pesquisa foi desenvolvida. A escolha pela atividade industrial de fabricação de papel deveu-se ao interesse da indústria objeto de estudo em investir em melhoria de qualidade ambiental visando reduzir a carga poluente e o volume de efluentes lançados no rio que passa ao lado da unidade fabril, de onde é retirada toda a água utilizada no processo industrial.

A redução de água nas indústrias de polpa e papel tem se tornado um dos principais focos, tanto econômico quanto ambiental, na implantação dos planos de ação (BOYSON, 1997).

Os custos ambientais devem ser absorvidos pelas indústrias, sendo que as externalidades (disposição de resíduos no ar, na água e no solo) podem ser internalizadas em parte pela minimização dos resíduos, pelo reuso direto e/ou indireto da água e conseqüente diminuição do lançamento e disposição de resíduos no meio ambiente.





“Uma estratégia básica para reduzir o consumo de água é o seu uso na saída de uma operação para satisfazer a água requerida para outra ou para a mesma operação. Em alguns casos a água pode requerer alguma regeneração” (TRIPATHI, 1996).

Porém, um dos maiores problemas no reuso e recirculação da água é a possibilidade da diminuição da vida útil dos equipamentos e do rendimento dos mesmos devido ao número de ciclos que influi no aumento de contaminantes, como a presença de metais e solventes orgânicos, da corrosividade, da possibilidade de afetar a operação e conseqüente diminuição da confiabilidade das unidades da indústria, da concentração de sais e da possibilidade de deterioração originada por microrganismos.

A viabilidade do reuso e recirculação dos efluentes gerados no processo industrial está diretamente ligada ao balanço financeiro da organização. Ou seja, os custos impostos pela matéria prima, no caso a água, devem ser maiores que aqueles compostos pela operação e processo do reuso e recirculação. Segundo HENSTOCK (1985) o termo *reciclabilidade* é a capacidade que o resíduo possui para produzir materiais recicláveis e viáveis financeiramente e ambientalmente.

O aumento do custo de disposição de efluentes e resíduos exerce pressão financeira que força as indústrias a procurarem tecnologias que reduzam o volume e a toxicidade de seus resíduos, melhorando a operação das unidades existentes ou introduzindo novos processos em novas instalações.

A implementação de operações e processos que visem reduzir o consumo de água e minimizar a geração de efluentes líquidos pode ser considerada como uma oportunidade de redução de custos pela melhora da eficiência e do controle do processo devido à diminuição do uso de matéria-prima, de produtos químicos e de energia.

A utilização de processos físico-químicos e operações associadas ou separadas, tais como a coagulação, floculação, flotação, sedimentação, filtração e oxidação, possuem a finalidade de permitir a adequação do efluente aos padrões de reutilização dos mesmos como forma de minimizar o consumo de água e/ou propiciar uma melhor eficiência global do tratamento de efluentes quando associados a processos biológicos.

Este trabalho relata estudos realizados na EESC/USP utilizando processos físico-químicos aplicados aos efluentes água clara e total de fábrica integrada de papel e celulose, restringindo o estudo ao efluente da máquina de papel.

MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida em unidade industrial que produz celulose e papel, localizada no Estado de São Paulo (omite-se o nome da empresa). O estudo foi centralizado no efluente da máquina de papel.

A pesquisa foi desenvolvida em três fases distintas, seqüenciais e inter-relacionadas que envolveram o levantamento do processo industrial, a caracterização qualitativa e quantitativa dos efluentes líquidos e estudo de tratabilidade do efluente com vistas a adequá-lo ao padrão de qualidade para reuso na Fábrica de Papel.

O presente artigo dedica-se somente à Fase 3, utilizando-se os dados obtidos nas fases anteriores como ponto de partida para o estudo de tratabilidade que envolveu a flotação por ar dissolvido do efluente total e do efluente água clara da máquina de papel, a ozonização, a ozonização posterior à flotação e a ozonização antecedendo a flotação desses dois efluentes



ENSAIOS DE FLOTAÇÃO

O efluente denominado água clara, o qual é resultado do tratamento preliminar de água branca através de filtro de disco, e o efluente total da máquina de papel foram submetidos à flotação por ar dissolvido. Os ensaios foram feitos em unidade de laboratório - flotateste - desenvolvida por REALI (1984). A porcentagem de recirculação foi de 18% e a pressão média da câmara de saturação foi de $450 \text{ kPa} \pm 10 \text{ kPa}$. Foram utilizados gradientes médios para floculação de 51 s^{-1} durante 10 minutos após mistura rápida de aproximadamente 2 minutos com variação de dosagem de cloreto férrico (0 a 60 mg/L para o efluente total e de 0 a 20 mg/L para o efluente água clara) e de pH (6,7 a 8,2 para o efluente total e de 6,3 a 8,3 para o efluente água clara) pela adição de hidróxido de sódio ou ácido clorídrico. Foram usadas velocidades de flotação de 70 m/dia, 150 m/dia e 300 m/dia.

Em todos os ensaios foram feitas as análises de turbidez, sólidos suspensos totais, cor aparente, pH e DQO do afluente e do efluente.

ENSAIOS DE OZONIZAÇÃO

Para realização dos ensaios foi utilizado conjunto piloto em batelada constituído de unidade geradora de ozônio (gerador Qualid'or, $8 \text{ gO}_3/\text{h}$ a partir do ar) e reatores de mistura e contato constituídos de frascos de 2 L. Esse conjunto foi desenvolvido por SAIA (1999).

Para oxidação utilizou-se 1,0 L de amostra variando-se em cada ensaio o pH e o tempo de contato. O residual de ozônio na fase líquida foi determinado pelo método DPD.

A calibração de produção de ozônio pelo gerador foi feita empregando-se o método iodométrico (APHA, 1995) fluxionando-se a mistura gasosa contendo ozônio em solução de iodeto de potássio a 2% em coluna de PVC.

Tanto para o efluente total da máquina de papel como para o efluente água clara foram aplicadas várias doses de ozônio (tempos de aplicação de 5, 10 e 15 min para água clara e 10, 20 e 30 min para o efluente total) com variação de pH.

ENSAIOS DE FLOTAÇÃO SEGUIDA DE OZONIZAÇÃO

O efluente total e o efluente água clara da máquina de papel foram submetidos à flotação seguida de ozonização. A velocidade de flotação foi mantida em 150 m/dia em todos os ensaios e a dosagem de cloreto férrico em 60 mg/L para o efluente total e em 40 mg/L para o efluente água clara, mantendo-se o pH natural do efluente. A dosagem de ozônio foi variada mediante a variação do tempo de aplicação que foi de 2, 4 e 6 min para o efluente total da máquina de papel e de 1, 2 e 3 min para o efluente água clara.

ENSAIOS DE FLOTAÇÃO PRECEDIDA DE OZONIZAÇÃO

A dosagem de ozônio e a dosagem de coagulante foram variadas conforme apresentado na tabela 1. A velocidade de flotação foi mantida em 150 m/dia em todos os ensaios.

Tabela 1 - Ensaios de ozonização seguida de flotação para tratamento do efluente água clara.

Tempo de aplicação de ozônio (min)	0	5	10	15
Dosagem de cloreto férrico (mg/l)	20, 40, 60	20, 40, 60	20, 40, 60	20, 40, 60



RESULTADOS E DISCUSSÕES

ENSAIOS DE FLOTAÇÃO

As características do efluente total e do efluente água clara da máquina de papel estão apresentadas na tabela 2. Os resultados dos ensaios de flotação do efluente total da máquina de papel estão apresentados nas tabelas 3 a 6 e os resultados dos ensaios realizados com a água clara estão apresentados nas figuras 7 a 10.

Tabela 2 - Características do efluente total e do efluente água clara da máquina de papel.

	pH	Turbidez (uT)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)
Efluente total	7,59	979	713	815
Efluente água clara	7,54	59	258	122

Tabela 3 - Ensaio de flotação do efluente total da fábrica de papel em pH natural de 7,59 com adição de cloreto férrico.

Concentração de cloreto férrico (mg/L)	Velocidade (m/d)	Turbidez (uT)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)
0	300	9,83	81	15
	150	9,5	76	12
	70	9,5	70	11
10	300	16,4	84	30
	150	11,7	75	11
	70	8,73	70	10
20	300	17,1	94	28
	150	12,1	81	11
	70	7,4	62	8
40	300	18,7	102	29
	150	8,14	81	8
	70	7,15	78	7
60	300	46,6	105	54
	150	12,9	73	16
	70	8,6	65	12

Tabela 4 - Ensaio de flotação do efluente total da fábrica de papel em pH de 8,20 com adição de cloreto férrico.

Concentração de cloreto férrico (mg/L)	Velocidade (m/d)	Turbidez (uT)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)
10	300	29,2	123	42
	150	18,8	105	23
	70	13,2	97	14
20	300	32,5	105	40
	150	15,5	94	18
	70	11,5	73	11
40	300	55	112	67
	150	15,1	78	19
	70	8,2	75	9
60	300	106	200	116
	150	17	78	23
	70	7,39	69	10



Tabela 5 - Ensaio de flotação do efluente total da fábrica de papel em pH de 6,98 com adição de cloreto férrico.

Concentração de cloreto férrico (mg/L)	Velocidade (m/d)	Turbidez (uT)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)
10	300	29,9	369	46
	150	16,1	320	26
	70	15,1	322	24
20	300	31,2	345	40
	150	14	306	26
	70	11,4	296	21
40	300	23,1	318	48
	150	10,8	307	21
	70	9,67	290	19
60	300	19	325	47
	150	8,44	294	31
	70	6,36	270	18

Tabela 6 - Ensaio de flotação do efluente total da fábrica de papel em pH de 6,72 com adição de cloreto férrico.

Concentração de cloreto férrico (mg/L)	Velocidade (m/d)	Turbidez (uT)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)
10	300	20,7	379	49
	150	12	374	33
	70	10,9	369	27
20	300	16,2	380	39
	150	10,9	354	28
	70	8,85	320	21
40	300	10,5	344	27
	150	7,61	332	18
	70	7,24	324	17
60	300	10,2	349	33
	150	6,01	311	17
	70	4,39	292	12

Tabela 7 - Ensaio de Flotação do efluente água clara em pH natural de 7,45 com adição de cloreto férrico.

Concentração de cloreto férrico (mg/L)	Velocidade (m/d)	Turbidez (uT)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)
0	300	12,4	153	42
	150	12,1	145	11
	70	7,88	135	8
10	300	8,1	153	11
	150	5,36	150	10
	70	6,23	86	5
15	300	28	216	60
	150	10,6	146	34
	70	9,2	142	15
20	300	6,06	127	12
	150	5,00	121	10
	70	4,67	67	5



Tabela 8 - Ensaio de Flotação do efluente água clara da fábrica de papel em pH de 8,33 com adição de cloreto férrico.

Concentração de cloreto férrico (mg/L)	Velocidade (m/d)	Turbidez (uT)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)
10	300	10,3	179	25
	150	7,61	136	13
	70	7,53	73	4
15	300	11	125	16
	150	6,26	122	7
	70	5,51	103	9
20	300	5,25	148	15
	150	6	129	12
	70	5,27	125	11

Tabela 9 - Ensaio de Flotação do efluente água clara da fábrica de papel em pH de 6,30 com adição de cloreto férrico.

Concentração de cloreto férrico (mg/L)	Velocidade (m/d)	Turbidez (uT)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)
10	300	8,22	137	17
	150	7,55	86	12
	70	7,22	86	5
15	300	7,44	144	8
	150	5,63	82	4
	70	5,36	74	4
20	300	5,82	104	7
	150	5,38	66	2
	70	5,35	70	3

Tabela 10 - Ensaio de Flotação do efluente água clara da fábrica de papel em pH de 6,72 com adição de cloreto férrico.

Concentração de cloreto férrico (mg/L)	Velocidade (m/d)	Turbidez (uT)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)
10	300	8,28	148	29
	150	7,58	107	14
	70	6,98	75	7
15	300	5,78	131	6
	150	5,09	70	4
	70	5,03	75	4
20	300	4,86	125	6
	150	4,24	70	9
	70	4,44	74	6

A flotação por ar dissolvido demonstrou ser eficiente na remoção de turbidez do efluente total da máquina de papel, para todas as dosagens de coagulante e velocidades de flotação empregadas nos ensaios. As menores eficiências ocorreram para as maiores velocidades de flotação, o que é aceitável, pois neste caso a taxa de aplicação hidráulica simulada no flotatete é elevada (300 m/dia). As menores eficiências ocorreram em pH 8,20 (dosagem de cloreto férrico de 10, 20, 40 e 60 mg/L e velocidade de flotação de 300 m/dia). A flotação do efluente em pH natural (7,59), ou seja, sem correção e sem adição de coagulante, forneceu resultados bons com turbidez remanescente de 9,50 a 9,83, com valores próximos de 9,50, independente das velocidades de flotação utilizadas nos ensaios. Como o efluente total da máquina de papel tem características favoráveis ao emprego da flotação, pode-se dispensar o uso de coagulante, embora esta condição seja específica para as características do efluente usado para estudo, não podendo ser generalizada para qualquer situação.



Para a água clara não foram observadas grandes diferenças nos ensaios entre o uso de pH natural e pH corrigido na remoção de turbidez com adição de coagulante e variação de velocidade de flotação. A remoção de SST teve comportamento semelhante ao da turbidez, acompanhando, inclusive, a forma das curvas de eficiência.

Para a água clara obteve-se valor mínimo de SST de 2 mg/L em pH 6,3, dosagem de coagulante de 20 mg/L e velocidade de flotação de 150 m/dia.

A remoção de DQO e de cor aparente apresentaram comportamento semelhante. Com a flotação foi obtida DQO mínima de 62 mg/L para efluente com pH natural (7,59) e dosagem de coagulante de 20 mg/L. Para a água clara a remoção de DQO apresentou comportamento diferente no que se refere ao formato das curvas de eficiência de remoção, indicando estabilidade de remoção para velocidade de flotação superior a 200 m/dia. A eficiência ficou na faixa de 40 a 50% para todos os valores de pH, dosagem de coagulante e velocidade de flotação superior a 200 m/dia. Para velocidade de flotação inferior a 200 m/dia a eficiência variou de 50 a 70%.

ENSAIOS DE OZONIZAÇÃO DO EFLUENTE TOTAL E DO EFLUENTE ÁGUA CLARA

Para o efluente total da máquina de papel nota-se pela tabela 11 a variação de alguns parâmetros devido à modificação do pH. Para a cor aparente, turbidez e sólidos suspensos o aumento de pH ocasiona aumento desses fatores, porém quando o pH torna-se menor ocorre solubilização, diminuindo a remoção dos parâmetros mencionados. Os resultados obtidos nos ensaios estão apresentados na tabela 12.

Tabela 11 - Características do efluente total da máquina de papel.

pH	DQO (mg/L)	Cor aparente (uC)	cor real (uC)	Turbidez (uT)	SST (mg/L)	SSV (mg/L)	SSF (mg/L)
7,9	604	1990	118	600	247	141	106
7,2	646	1050	112	234	187	148	39
8,6	631	2355	114	832	279	147	132

Tabela 12 - Tempo de contato, produção e consumo de Ozônio aplicado sobre o efluente total da máquina de papel com efeitos na DQO, cor aparente, cor real, turbidez e sólidos suspensos com variação do pH.

pH	Tempo de Contato (minuto)	Produção (mg/L)	Off Gás (mg/L)	Ozônio Consumido (mg/L)	DQO (mg/L)	Cor aparente (uC)	Cor real (uC)	Turbidez (uC)	SST (mg/L)	SSV (mg/L)	SSF (mg/L)
7,9	10	50	19,92	30,08	572	1940	101	576	236	133	103
	20	86	32,16	53,84	592	1865	73	582	226	126	100
	30	130	69,6	60,4	604	1815	71	600	230	128	102
7,2	10	50	22,08	27,92	644	1050	116	218	165	129	36
	20	86	34,32	51,68	606	1040	107	194	159	124	35
	30	130	73,2	56,80	608	990	92	224	164	130	34
8,6	10	50	17,28	32,75	596	2235	110	832	243	118	125
	20	86	40,08	45,92	610	2265	108	800	253	124	129
	30	130	88,8	41,2	585	2215	98	786	249	127	122

Para o efluente total a remoção de DQO foi baixa, obtendo-se 5,3% para pH natural e máximo de 7,3 para pH 8,6. A remoção de cor aparente, ao contrário da DQO, foi máxima para o pH natural (39,8%). A remoção de turbidez tende à máxima eficiência para o pH 8,6 com tempo de contato de 20 minutos (eficiência de remoção de 70,8%).

As características do efluente água clara e os resultados dos ensaios de ozonização estão apresentados, respectivamente, nas tabelas 13 e 14.

Tabela 13 - Características do efluente água clara da máquina de papel.

DQO (mg/L)	Cor aparente (uC)	Cor real (uC)	Turbidez (uT)
404	432	34	47,4



Tabela 14 - Tempo de contato, produção e consumo de Ozônio aplicado sobre o efluente água clara da máquina de papel com efeitos na DQO, cor aparente, cor real e turbidez.

pH	Tempo de Contato (minuto)	Produção (mg/L)	Residual (mg/L)	off gás (mg/L)	Ozônio Consumido (mg/L)	DQO (mg/L)	Cor aparente (uC)	Cor real (uC)	Turbidez (uC)
8,8	5	30	0,07	7,2	22,73	381	194	16	27,4
	10	50	0,05	0	49,95	395	203	16	23,2
	15	65	0,05	0	64,95	390	191	13	17,3
6,1	5	30	—	6	24	386	193	25	31,6
	10	50	—	18	32	389	212	23	23,6
	15	65	—	27,6	37,4	391	225	22	25,5
7,9	5	30	0,02	8,4	21,58	375	188	23	25,4
	10	50	0,02	14,4	35,58	387	197	22	24,5
	15	65	0,03	26,4	38,57	388	202	18	16,8
6,8	5	30	—	8,4	21,6	389	176	26	22,2
	10	50	—	13,2	36,8	392	178	19	21,2
	15	65	—	27,6	37,4	392	182	18	13,8

Para o efluente água clara os melhores resultados de remoção de DQO foram obtidos para o pH natural (7,9). A remoção de cor aparente apresentou melhores resultados em pH 6,8, obtendo-se eficiência máxima de 59,3%. Para turbidez remanescente, em todos os pH obteve-se diminuição em valores absolutos conforme aumento da dosagem de ozônio aplicada, obtendo-se a melhor eficiência (70,9%) em pH 6,8 com tempo de contato de 15 minutos.

ENSAIOS DE FLOTAÇÃO SEGUIDA DE OZONIZAÇÃO

As características físico-químicas do efluente total da máquina de papel e os resultados dos ensaios de flotação e ozonização estão apresentadas na tabela 15, 16 e 17.

Tabela 15 - Característica físico-química do efluente total da máquina de papel.

DQO (mg/L)	DQO solúvel (mg/L)	DBO (mg/L)	Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	SST (mg/L)	Condutividade (µS)
562	249	168,2	1840	269	264	540,7

Tabela 16 - Características físico-químicas do efluente total da máquina de papel após tratamento por flotação com velocidade de 150m/d e 60 mg/L de cloreto férrico.

DQO (mg/L)	SST (mg/L)	DBO (mg/L)	Cor (uC)	Turbidez (uT)	Dureza (mg/L de CaCO ₃)	Alcalinidade (mg/L de CaCO ₃)
228	24	61,2	208	7,21	74,9	118,8

Tabela 17 - Característica físico-química do efluente total da máquina de papel após flotação (velocidade de 150m/d e aplicação de 60mg/L de coagulante) seguido por ozonização com variação na aplicação de O₃.

Tempo de contato (min)	Produção de O ₃ (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	DBO (mg/L)	Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	Dureza (mg/L de CaCO ₃)	Alcalinidade (mg/L de CaCO ₃)
2	12	220	20	50,4	146	7,95	157,6	115,8
4	24	216	34	52,1	123	6,21	167,8	115,8
6	36	222	36	53,1	155	9,18	167,8	115,8



Para o efluente total da máquina de papel a eficiência de remoção de DQO pela ozonização foi muito baixa, alcançando apenas 3,5% para tempo de contato de 2 minutos; 5,3% para tempo de contato de 4 minutos e 2,7% para tempo de contato de 6 minutos. A eficiência de remoção de cor aparente pela ozonização obteve resultados melhores, alcançando 29,8% para tempo de contato de 2 minutos; 40,9 % para tempo de contato de 4 minutos e 25,5% para tempo de contato de 6 minutos.

A caracterização físico-química e os resultados dos ensaios de flotação e ozonização do efluente água clara estão apresentados nas tabelas 18, 19 e 20.

Tabela 18 - Característica físico-química do efluente água clara da máquina de papel.

DQO (mg/L)	DQO solúvel (mg/L)	DBO (mg/L)	Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	SST (mg/L)	Condutividade (µS)
418	266	56	905	64,7	130	608

Tabela 19 - Características físico-químicas do efluente água clara da máquina de papel após tratamento por flotação com velocidade de 150m/d e 40 mg/L de cloreto férrico.

DQO (mg/L)	SST (mg/L)	DBO (mg/L)	Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	Dureza (mg/L de CaCO ₃)	Alcalinidade ((mg/L de CaCO ₃))
255	28	53	300	9,12	27,6	89,1

Tabela 20 - Característica físico-química do efluente água clara da máquina de papel após flotação (velocidade de 150m/d e aplicação de 40mg/L de coagulante) seguido por ozonização com variação na aplicação de O₃.

Tempo de contato (min)	Produção de O ₃ (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	DBO (mg/L)	Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	Dureza (mg/L de CaCO ₃)	Alcalinidade (mg/L de CaCO ₃)
1	6	253	24	49,6	297	9,88	27,6	89,1
2	12	242	36	44,8	230	10,7	27,6	89,1
3	18	231	24	59,2	170	9,75	27,6	89,1

Para o efluente água clara a eficiência de remoção de DQO foi baixa variando de 0,8% para tempo de contato de 1 minuto a 9,4% para tempo de contato de 3 minutos.

A eficiência de remoção de cor aparente foi muito baixa para tempo de contato de 1 minuto (1% de remoção), aumentando para maiores tempos de contato (23,3% e 43,3% para tempos de contato de 2 e 3 minutos, respectivamente).

ENSAIOS DE FLOTAÇÃO PRECEDIDA DE OZONIZAÇÃO

A água clara utilizada nos experimentos apresentou as características que constam na tabela 20. Os resultados obtidos estão apresentados nas tabelas 21 a 24.

Tabela 21 - Características físico-químicas do efluente água clara.

pH	DQO (mg/L)	DQO solúvel (mg/L)	DBO (mg/L)	Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	SST (mg/L)	SSV (mg/L)	SSF (mg/L)	ST (mg/L)
7.6	396	235	62,4	530	135	142	132	10	323



Tabela 22- Ensaio de flotação com velocidade de 150 m/d utilizando 20mg/L de cloreto férrico após aplicação do ozônio com variação do consumo de O₃ sobre o efluente água clara da máquina de papel, modificando a eficiência de remoção sobre a DQO, cor aparente, turbidez, DBO e sólidos suspensos totais.

Tempo de contato (min)	DQO (mg/L)	Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	SST (mg/L)	DBO (mg/L)	Off gás (mg/L)	Residual (mg/L)	Produção (mg/L)	Consumo (mg/L)
0	223	246	19	32	53,2	—	—	—	—
5	229	264	20,1	26	55,2	7,2	—	30	22,8
10	228	229	19,9	26	56	22,8	—	50	27,2
15	206	226	18,9	24	67,4	34,2	—	65	30,8

Tabela 23 - Ensaio de flotação com velocidade de 150 m/d utilizando 40mg/L de cloreto férrico após aplicação do ozônio com variação do consumo de O₃ sobre o efluente água clara da máquina de papel, modificando a eficiência de remoção sobre a DQO, cor aparente, turbidez, DBO e sólidos suspensos totais.

Tempo de contato (min)	DQO (mg/L)	Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	SST (mg/L)	DBO (mg/L)	Off gás (mg/L)	Residual (mg/L)	Produção (mg/L)	Consumo (mg/L)
0	237	189	15,2	16	49,3	—	—	—	—
5	220	168	15,1	12	55,9	7,2	—	30	22,8
10	236	162	15,5	18	57,4	22,8	—	50	27,2
15	208	130	15,3	16	47,8	32,6	—	65	32,4

Tabela 24 - Ensaio de flotação com velocidade de 150 m/d utilizando 60mg/L de cloreto férrico após aplicação do ozônio com variação do consumo de O₃ sobre o efluente água clara da máquina de papel, modificando a eficiência de remoção sobre a DQO, cor aparente, turbidez, DBO e sólidos suspensos totais.

Tempo de contato (min)	DQO (mg/L)	Cor aparente (uC)	Turbidez (uT)	SST (mg/L)	DBO (mg/L)	Off gás (mg/L)	Residual (mg/L)	Produção (mg/L)	Consumo (mg/L)
0	214	155	12,1	24	45,8	—	—	—	—
5	210	129	10,1	18	49,2	6,8	—	30	23,2
10	202	116	8,7	18	46,5	20,2	—	50	29,8
15	201	105	9,6	14	54,5	33,1	—	65	31,9

A remoção máxima de DQO devido ao processo combinado ozonização/flotação foi de 48%, com melhora de apenas 4,3% devido à ozonização. A remoção de cor aparente foi de 57,4%, com aumento de eficiência de 3,8% proporcionado pela ozonização. Para a remoção de turbidez a influência da ozonização foi insignificante.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e considerando as características físico-químicas e as condições em que os ensaios foram feitos conclui-se que:

- o pH natural do efluente total da máquina de papel e da água clara foi o que forneceu melhores resultados de remoção de turbidez, SST, DQO e cor aparente, com aplicação de cloreto férrico como coagulante;
- a eficiência de remoção de turbidez, SST, DQO e cor aparente foi menor em pH mais baixo;
- o efluente total da máquina de papel, em um dos ensaios, não necessitou de adição de coagulante nem de correção de pH, fornecendo os melhores resultados de remoção de turbidez, SST, DQO e cor aparente quando se usou somente flotação;
- mesmo para velocidade elevada de flotação (20,83 cm/min) a remoção de turbidez foi elevada;
- a oxidação com ozônio, para as doses e tempos de contato empregados, não mostrou ser eficiente na redução de DQO e cor;
- a flotação com pré-ozonização apresentou pouca melhora na eficiência de operação de flotação, podendo ser desconsiderada como alternativa de tratamento.



AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela concessão de bolsa de mestrado e à FAPESP pela concessão de auxílio pesquisa (processo 97/12404-4)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 19a ed., Washington, EUA, 1995.
2. BOYSON, S. (1997). Water management with mechanical seals. *Tappi Journal*, vol. 82 n. 6, jun.
3. HENSTOCK, M. E.. *Design for Recyclability*. The Institute of Metals Institute of Metals on behalf of The Materials Forum. Aldem Press, Oxford, 1985.
4. REALI, M. A. P.. *Aplicação da flotação por ar dissolvido ao tratamento de águas de abastecimento*. São Carlos. 186 p. Dissertação (Mestrado). EESC, Universidade de São Paulo, 1984.
5. SAIA, F. T. *Remoção de cor de efluente de indústria têxtil por processo avançado de oxidação*. Dissertação (Mestrado). EESC, Universidade de São Paulo, 1999.
6. TRIPATHI, P.. *Pinch Technology Reduces Wastewater*. *Chemical Engineering*. p. 87-100, nov., 1996.