AERAÇÃO ARTIFICIAL DE CURSOS DE ÁGUA

SEBASTIÃO LEME LEMI ^{we} FURQUIM

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo, Departamento de Saúde Ambiental, para obtenção do título de Mestre em Saúde Pública.

Orientador: Prof. Carlos Celso do Amaral e Silva

São Paulo
1978

A você Ruth minha mulher,
A você Nando meu filho,
pelo amor e incentivo
oferecidos, apesar das privações
que sofreram nestes últimos anos.

A meus pais (in memoriam)
Pelo muito que se orgulharam;
Pelo tão pouco que fiz.

Agradecimentos

A CAPES pelo apoio oferecido na impressão deste trabalho.

Muitas são as pessoas a que se tem que ficar grato na elaboração de um trabalho desta natureza, dificilmente se teria condições de citar todos. Alguns nomes pois, foram citados, embora muitos, mas muitos outros fossem os lembrados.

Na pessoa do amigo e Professor Carlos Celso do Amaral e Silva, meu orientador, agradeço todos os ensinamentos recebidos nos bancos e corredores da nossa querida Faculdade de Saúde Pública, e a todos os seus membros do corpo docente.

Na pessoa prestimosa do Eng^o Alir Dória, agradeço as gentilezas e palavras de incentivo, assim como, as atenções recebidas dos colegas e amigos da TECNOSAN Engenharia S.A.

Na pessoa da competente bibliotecária Daisy Pires Noronha agradeço as ajudas e atenções recebidas, nas muitas bibliotecas visitadas.

Na pessoa da minha sogra e mãe adotiva, Maria Stella Alves da Costa, agradeço todos aqueles que me dedicaram orações nas horas difíceis, felicitações após as barreiras vencidas.

Se este trabalho tiver que ser considerado pequeno, que não seja visto como uma migalha, mas sim como uma semente, para que germine, cresça e possa dar frutos.

Í N D I C E

	<u>Página</u>
1 - <u>Apresentação</u>	1
2 - <u>Conceituação</u>	4
3 - <u>Depuração Natural</u>	28
3.1 - <u>Introdução</u>	29
3.2 - <u>Formulação Matemática</u>	38
4 - <u>Aeração Artificial</u>	49
4.1 - <u>Introdução</u>	50
4.2 - <u>O "deficit" de oxigênio</u>	52
4.3 - <u>Princípio da Aeração</u>	53
4.4 - <u>Quando Aerar Artificialmente</u>	54
4.5 - <u>Finalidade da Aeração Artificial. Localização</u>	56
4.6 - <u>A Escolha do Equipamento</u>	60
4.7 - <u>Dimensionamento do Equipamento</u>	71
4.8 - <u>Conclusões</u>	72
5 - <u>Referências Bibliográficas</u>	74

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

	<u>Página</u>
Figura 1 - Zonas de autodepuração de um curso d'água	34
Figura 2 - Curva de depressão de oxigênio	41
Figura 3 - Trecho de um rio de extensão "e"	44
Figura 4 - Perfil de O_2 de um rio	56
Figura 5 - Perfil de O_2 após a aplicação do aerador	57
Figura 6 - Concentração de O_2 em função do tempo	59
Figura 7 - Alternativa de localização de aeradores	60
Figura 8 - Turbina instalado no Rio Ruhr	61
Figura 9 - Introdução de O_2 Puro	63
Figura 10 - Planta e elevação de um aerador flutuante	66
Figura 11 - Cortes e Detalhes	67
Figura 12 - Planta e elevação	68
Figura 13 - Ampliação - Detalhe motor e rotor	68
Figura 14 - Rotor aberto com pás	69

ÍNDICE DAS TABELAS

Página

Tabela 1 - Cotejo técnico e econômico

70

Resumo

Não se pode esperar muito de soluções únicas e isoladas quando estão envolvidos problemas pertencentes ao complexo da ecologia e da poluição ambiental. Os problemas de poluição, pois, como qualquer questão ligada ao meio ambiente, requerem preocupações e correções múltiplas que envolvem como um todo as grandes áreas da poluição do ar, do solo e das águas. Resta a um rio que já recebeu poluição, apenas uma alternativa, depurar-se. A capacidade de autodepuração de um curso de água poluído, está diretamente relacionada com a capacidade que possui o sistema de transferir oxigênio do ar para o interior da massa líquida. Por essa razão rios turbulentos e acidentados têm maior capacidade de autodepurar-se que os rios de planície. Baseados neste conceito, foram idealizados, na Holanda, os sistemas de tratamento denominados valos de oxidação, que constituem verdadeiros modelos reduzidos de rio, nos quais a reaeração é obtida através da turbulência provocada artificialmente por intermédio de agitadores superficiais. Uma variante desse método é a de se instalar agitadores, ou seja, aeradores nos próprios rios, vindo constituir verdadeiras cachoeiras artificiais. Levantou-se a experiência de outros países, formulários e os processos existentes. Organizou-se um cotejo técnico e econômico entre os mesmos e concluiu-se que o mais indicado é o de aeradores superficiais, devido ao seu menor custo e versatilidade operacional.

Summary

You can not expect much of a single or isolated solution when you have problems that involves the ecology and environmental pollution complex. The pollution problems as well as any question related to the environment, requires concern and multiple corrections as a whole in the pollution areas of air, soil and water. As for a polluted river there is only one alternative, self-purification. The purification capacity of a polluted stream is directly related to its capacity to absorb oxygen from the atmosphere. For this reason turbulent rivers have greater capacity of purification than the plain uniform rivers. With this concept, it was studied in Holland the oxidation ditches, for treatment systems. In this reduced river model the reaeration is artificially obtained by superficial aerators. One alternative of this method is to install aerator directly on the river to provoke water turbulence. The experience of other countries was obtained, as well as formularies and existing processes. An organized technical and economical comparison, was made which led to the conclusion that the superficial aerators are recommendable due to its low cost and operation versatility.

1 - Apresentação

Quem habita São Paulo acaba acostumando a se deparar com afirmativas espetaculares. Algumas são motivo de orgulho, tais como:

- É a cidade mais rica da América Latina.
- É a maior concentração urbana do Brasil.
- É o parque industrial mais desenvolvido, do Brasil.
- Tem a maior renda "per capita" do País.

Outras afirmativas porém são alarmantes e motivo de muitas preocupações:

- Sua periferia tem das mais altas taxas de mortalidade infantil do mundo.
- Todos seus rios e córregos estão poluídos.
- É a cidade de ar mais poluído do continente.
- O percentual de habitantes que são servidos por rede de água e de esgotos é dos mais reduzidos.

Quem mora em São Paulo e ainda atua direta ou indiretamente com o tema poluição, como é o caso do Engenheiro Sanitarista, é natural que sinta uma necessidade emergente de fazer alguma coisa, fornecer alguma contribuição no sentido de se obter uma somatória de esforços a convergir para a resolução de problemas difíceis, como são os dessa imensa cidade, dada sua grandiosidade, indiscriminada.

"Não é preciso alongar-se na descrição dos problemas de São Paulo. Eles estão aí, aparecem nas primeiras

páginas dos jornais em cada minuto de todos os dias nos olhos sem brilho, nas bocas sempre sérias e fechadas, nos enfartes, nas úlceras, na neurose coletiva e no drama de cada um".²⁵

Acreditando, principalmente, que no futuro, os rios desta terra recuperarão a saúde perdida, iniciou-se este trabalho com os olhos voltados para o horizonte, e pôde-se, talvez sonhando, ver o rio Tietê inteiramente navegável, suas águas tornadas claras, muitos peixes e plantas aquáticas e conseqüentemente, pólo de recreação e lazer do paulistano.

Assim, se umas poucas palavras deste trabalho vierem a colaborar na solução de seus problemas, o autor se sentirá fartamente recompensado.

2 - Conceituação

A deterioração ambiental iniciou-se quando se formaram as primeiras vilas e as primeiras cidades. O homem usava o fogo, e ao mesmo tempo espalhava dejetos e detritos por toda parte. Pouco a pouco os ambientes ecológicos iam sofrendo transformações sob o olhar indiferente de autoridades e das crescentes populações.

A própria natureza se incumbia de resolver o problema dada a existência de grandes áreas verdes e a proporção entre o volume dos rios e a densidade das populações de então.

Do final da primeira metade deste século para cá, com a eclosão das chamadas cidades industriais e com o crescimento marcante das populações, a contaminação e alteração dos vários meios ecológicos tem-se constituído em uma séria ameaça à existência de muitas comunidades de animais e vegetais e pode finalmente ameaçar a sobrevivência da raça humana.

Os aspectos sanitários da ecologia vêm assumindo importância cada vez maior nos dias de hoje, principalmente nos aspectos da ecologia humana. Uma nova mentalidade em todo o mundo, em face das alterações que o homem inflige ao meio em que vive, é a responsável por inúmeros trabalhos e obras de saneamento que buscam amenizar a conturbação ambiental. Saneamento é indicado inclusive como índice de civilização.

Muito se tem falado de ecologia e segundo Branco⁵ (1972), tem-se a seguinte definição:

"O princípio de Lavoisier, enunciado em lingua

gem corrente pela frase: "Na natureza nada se cria e nada se consume: tudo se transforma", é de importância fundamental, seja com relação às formas de energia, seja, por extensão, com relação às estruturas biológicas. Todo o grande conjunto de formas vivas que constitui a natureza viva, desde as mais primitivas até as mais evoluídas, acha-se interligado por relações dinâmicas de interdependência, mais do que por simples laços estáticos de semelhança, de parentesco ou de posição geografica. Dessa forma, pode-se afirmar que a existência e a sobrevivência do homem estão na dependência da existência de formas mais primitivas e até microscópicas de vida, tais como bacterias e muitos outros organismos que integram o ciclo da energia e das substâncias da natureza. O estudo desse conjunto de relações é denominado "ecologia".

O ambiente do homem é o ar atmosférico. Deste modo, ele é atingido diretamente pelas modificações introduzidas no ar, e indiretamente, atingido pelas alterações verificadas no solo e nas águas de que se utiliza. Ao conjunto destas alterações dá-se o nome genérico de poluição, ou ainda, particularmente para cada um dos casos, o nome de poluição do ar, do solo, das águas e outros tantos tipos que a imprensa falada e escrita de todo o mundo criou.

Observa-se que a palavra poluição vem sendo utilizada de forma exagerada, assim é que Branco⁵(1972) afirma:

"Poluição, no seu sentido mais amplo, pode ser entendida como qualquer modificação de características de um ambiente de modo a torná-lo impróprio às formas de vida que ele normalmente abriga. Para fins práticos, entretanto, essa definição deve ser mais restrita, de modo a incluir um elemento indicador de prejuízo sanitário, econômico ou simplesmente

estético. Isto significa que a modificação do ambiente, para ser realmente considerada poluição, deve afetar, de maneira nociva, direta ou indiretamente, a vida e o bem estar humano".

As opiniões pessoais neste campo, são as mais controvertidas, e é importante notar que uma pequena variação no procedimento conceitual interfere muito com o tipo de solução do problema que se tem que enfrentar. É muito mais importante, ainda, notar até que ponto é válido o direito que têm alguns homens da geração atual de decidir o que é realmente justo para as gerações futuras? Até que ponto o homem, que decide e influi no comportamento de gerações, deve ser parcimonioso e permitir concessões? Uma posição mais moderna, e que pouco a pouco toma conta de todos, e de que aparentemente ninguém pode assumir a paternidade da idéia, é que mesmo que o homem tivesse sido aquinhado com o privilégio de ser o centro das atenções e direitos das coisas do mundo, e portanto tivesse adquirido o direito moral de sujeitar o mundo apenas para seu único e exclusivo benefício, deveria fazê-lo nas melhores condições, e crê-se que só o faria com êxito se se submetesse a certas leis naturais, respeitando um equilíbrio que, atingidos determinados limites, não poderia mais ser modificado.

Já no século XVIII, experiências verificaram que um animal, como um camundongo, ou então uma planta, quando colocados isoladamente sob campânulas de vidro, morriam em algumas horas. Entretanto, quando colocados juntos sob a mesma campânula e, em presença de luz, sobreviviam⁴.

Essas experiências, muito simples, constituíram-se na pedra fundamental da ciência ecológica. Pois vieram demonstrar e revelar os fatos básicos da fisiologia animal e vegetal. O princípio do equilíbrio biológico entre organismos

heterôtrofos e autôtrofos fotossintetizantes é básico, não só para a economia natural dos seres de vida terrestre, mas tam bém para a dos aquáticos, em todos os níveis.

A estes valores e leis naturais todos os seres, inclusive o homem, são submissos.

Todavia, é sintomático constatar-se que o homem despende, cada vez mais intensamente, seus recursos e suas ener gias, para criar uma proteção contra suas próprias atividades e os efeitos perniciosos que delas decorrem: no fundo, para se proteger contra si mesmo⁹. Parece, assim, que o homem vive num universo absurdo, por ter ele mesmo deturpado certas leis que se aplicam ao conjunto de um mundo no qual a sua raça surgiu um dia.

Disse o ecologista Dorst⁹ (1973), em frases es colhidas:

- "Ou se consegue salvar o homem e a natureza, conjuntamente, numa feliz harmonia, ou a nossa espécie estará condenada a desaparecer com os últimos restos de um equilíbrio que não foi criado para dificultar o desenvolvimento da huma nidade, mas sim para lhe servir de contexto".

- "A poluição das águas doces, dos mares e da atmosfera atingiu um ponto tal que, ultrapassado, não será mais suportável. Podem ser previstas, para breve, perturbações em es cala mundial. Sabemos que o homem é capaz de modificar o cli ma de vastas regiões num sentido desfavorável, criando deser tos e ruínas. No futuro, a multiplicação dos vôos de aviões supersônicos têm sérias probabilidades de destruir as camadas protetoras existentes a grandes altitudes, esterilizando assim uma parte da terra. Nosso planeta pode tornar-se um astro mor

to. Não possuímos nenhum dado preciso que nos permita avaliar as probabilidades de semelhante catástrofe; antes porém, de as termos calculado, não temos o direito de expor a humanidade a esse perigo".

- "A expansão industrial pode aumentar consideravelmente seu preço. Como disse Singer, existe um nível além do qual uma nação despende grande parte da sua capacidade de produção unicamente para manter a cabeça fora da água suja".

- "Já é tempo. Se nos atrasarmos, travaremos apenas combates de retaguarda que serão imediatamente seguidos pela derrota da natureza; e a derrota da natureza será também a derrota do homem e da nossa civilização ocidental".

Talvez haja quem encontre exagero nestas palabras, mas uma coisa é certa: o homem custou muito para pensar na otimização pregada pelo sanitaria e certamente abominada pelo ecologista, purista. Parece que o economista, despreocupado com a natureza foi sempre o melhor sucedido.

Considera-se modernamente que o ecologista e o economista sejam os dois extremos. A posição mediana é ocupada pelo sanitaria, encarregado de cientificamente dosar as controvertidas filosofias econômicas e de conservação da natureza.

Lamentavelmente, a maioria das decisões que afetam ou afetaram o futuro do ambiente foi tomada, antes de tudo, na base de uma análise tipo custo-lucro, quando não de vantagem política, não levando em conta concepções que respeitam os recursos naturais e princípios ecológicos que garantam benefícios sociais a longo prazo.

Entretanto, pode ser sentido nas conversas do dia a dia, nas leituras de jornais e revistas, nas letras de músicas de apelo ecológico, que o homem começa a se preocupar com a natureza que o cerca, enfim, é o auto-reconhecimento que aparentemente surge de uma natureza que clama por uma solução menos maléfica que a atual. A briga parece que começa a sair espontaneamente da esfera técnica e reservada que muito tempo ficou, para ganhar domínio público e generalizado.

Na realidade, afora este quase misticismo que toma conta da consciência da humanidade, as leis que regiam as relações entre o homem e o seu meio foram consideradas obsoletas. Não há mais pacto que una o homem à natureza. O homem se sente emancipado do complexo biológico que a todos interliga sobre a face da terra. Mas o povo também se sente responsável, e começa a ter problemas de consciência, começa a fazer apelos. É tempo de conscientização, é momento de educar, é tempo de ensinar desde a escola maternal, o amor que se deve ter à natureza. Sem fanatismo, é verdade, mas com tirocínio e uso da razão, não desprezando nunca o amor à natureza, é preciso insistir.

A Lei Estadual nº 997, de 31 de maio de 1976 publicada no Diário Oficial do Estado de São Paulo, em 01 de junho de 1976, e que dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente, demonstra claramente que a posição do sanitarista vem sendo reforçada, e amparada, como filosofia a ser adotada oficialmente, ou seja, a lei define poluição como sendo:

"Considera-se poluição do meio ambiente a presença, o lançamento ou a liberação, nas águas, no ar ou no solo, de toda e qualquer forma de matéria ou energia, com intensidade, em quantidade de concentração ou com características

em desacordo com as que forem estabelecidas, em decorrência desta lei, ou que tornem ou possam tornar as águas, o ar ou o solo impróprios, nocivos ou ofensivos à saúde; inconvenientes ao bem estar público; prejudiciais à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais à comunidade e danosos aos materiais, à fauna e à flora".¹⁸

Poluente segundo a mesma lei:

"Considera-se poluente toda e qualquer forma de matéria ou energia que, direta ou indiretamente, cause poluição do meio ambiente".¹⁸

Como se pode notar, é permitido introduzir outras substâncias ao meio ambiente original, porém este sô será considerado poluído; ou por outra, sô se considera que há polução se for excedido o limite de intensidade e concentração que tornem a água, o solo ou o ar impróprios ou nocivos ao homem, fauna, flora e materiais.

Seguramente, dentre as atividades que preocupam o mundo técnico-científico de hoje, nenhuma outra se reveste de consequências tão profundas para o futuro do homem quanto a conservação do ambiente. As análises custo-lucro tendem cada vez mais a ficarem dificultadas.

O enfoque de conservação do meio ambiente, com vistas a garantir para o homem condições de vida mais humanas, e que possui hoje maior aceitação, é aquele que procura equacionar de forma global e integrada, as diferentes questões relacionadas com o meio onde vivem essas populações. Em outras palavras, assuntos de saúde pública, educação, engenharia, alimentação, não podem e não devem ser tratados separadamente, mas sim, ser estudados em suas relações mútuas e para com o meio.

O alarme mundial já foi dado. Muita coisa já foi feita, e muita coisa resta a fazer. Ou enfrenta-se com coragem os problemas gerados pela poluição do meio ambiente, ou o homem será rapidamente atingido em sua essência, pela consequência da evolução desordenada que promoveu. Esta é a ordem do dia.

O custo deste alarme e motivação do público e autoridades, porém, já se faz presente. E os custos já não podem mais ser evitados. Esta geração que se inicia talvez possa dizer que ela os herdou de uma tradição anterior.

O cidadão paga, pode ser como consumidor, como contribuinte ou mesmo como vítima. Os problemas políticos e econômicos levantados por esse preço inexorável e inevitável originam-se do fato de que diferentes cidadãos são afetados em graus bastante diversos. Ora pois, o contribuinte pode encontrar-se fora do alcance das principais poluições e não sentir o estímulo direto para eliminá-las, mas paga. O consumidor, muitas vezes não sabe o que está pagando, mas paga. E agora o maior problema. Os cidadãos mais pobres dificilmente podem aceitar de bom grado um aumento de preços de consumo para os artigos de primeira necessidade, mesmo quando lhes acenem, ou mesmo lhes agrada desfrutar, uma atmosfera mais limpa²⁸. E agora? A conjectura de quanto e quem pagará é pois o elemento de cunho político vital para qualquer programa a se formular.

Naturalmente, é necessário planejar, e em todos os sentidos. A área de solo disponível no planeta é fixa, e por outro lado, a população que vive e depende deste solo, cresce em ritmo assustador.

Na época paleolítica a população era de cerca

de 5 milhões, cresceu do ano 8000 a.C. para o ano 1650 d.C. para 600 milhões²⁸. Nestes 9650 anos a população cresceu 2 vezes a cada 1500 anos. No ano de 185 d.C., a população alcançou 1 bilhão de habitantes, tendo-se duplicado agora em 200 anos. Em 1930, só 80 anos depois, a população alcançou 2 bilhões, dobrou de novo. Em 1975, atingiu-se 4 bilhões, dobrou e só passaram 45 anos da última cifra. Estes períodos tendem a ser cada vez mais curtos, e o valor absoluto a ser atingido é cada vez mais dramático⁶.

Como manter o equilíbrio e as leis naturais, a que inclusive o homem é submisso?

E necessário planejar, mas ...

O solo deve ser ocupado adequadamente, é preciso prever áreas industriais, comerciais, residenciais, áreas de cultivo e criação. Problemas do planejamento territorial em escala mundial.

E necessário preservar a natureza pois, o solo irá dar o sustento do homem, a água deverá matar sua sede, abastecer cidades e indústrias, propiciar lazer. E o ar? Bem, o homem precisa respirar ...

Para que haja solo, água e ar disponíveis e utilizáveis, é preciso não os destruir com a poluição.

Naturalmente, dentre as muitas formas de poluição que foram criadas, três são realmente as áreas a que se deve dar mais atenção; em que, de certo modo, todas as outras estariam englobadas. Ou seja, as três áreas gerais de poluição, a atmosfera, a água e o solo, se caracterizam por serem, também, os três principais elementos constituintes da vida planetária.

A atmosfera, do ar e dos climas; a litosfera, da qual, durante milênios, tem desmoronado e decomposto rochas para constituir a fina e frágil cobertura que é o solo, sobre a qual o homem vive; a hidrosfera, dos rios, mares e lagoas; estão todas entre laçadas em todos os sistemas que mantêm a vida orgânica. Sem a contínua interação através de todos os íons da existência do planeta, a pequena biosfera, complexo de seres vivos, inclusive o homem, simplesmente nunca teria aparecido. Perfeitamente óbvio é que aquelas interações continuem havendo e que sejam inevitáveis. É pois, a explicação de que quando qualquer deles é usado de maneira danosa, o seu efeito se amplia pelo comprometimento que causa, pela própria intimidade de sua associação com os outros sistemas⁹.

Em resumo, os problemas de poluição, como qualquer questão ambiental, requerem preocupações e correções múltiplas: Ar, solo e água.

O ar é o ambiente ecológico do homem e de todos os seres vivos exceto vegetais que habitam a face da terra, não coberta pelas águas, embora, não existam organismos que sejam habitantes exclusivos da atmosfera. No entanto, a atmosfera possui os componentes indispensáveis à maioria deles⁶.

A camada gasosa que circunda o globo terrestre, também denominada de ar, é composta da mistura de vários elementos e compostos gasosos, além de possuir matérias sólidas e líquidas, na forma de partículas e aerossóis em suspensão. A sua composição tem sofrido alterações ao longo do tempo, desde a formação da terra, e apresenta algumas variações de região para região, principalmente quanto ao seu teor de umidade e partículas em suspensão.

Sob o ponto de vista ecológico os três princi

país elementos são o oxigênio, o gás carbônico e o nitrogênio. Deve existir um equilíbrio mais ou menos constante entre a quantidade destes gases na atmosfera. As atividades humanas contribuem significativamente para alterar ou prejudicar esse balanço de concentrações, principalmente através da queima de combustíveis. Com a queima de enormes reservas de petróleo, madeira, carvão e outros, há redução de oxigênio e aumento do gás carbônico. Com relação ao nitrogênio enormes quantidades vêm sendo extraídas do ar, em processos industriais de fabricação de adubos.

Difícilmente a diminuição destes elementos chegarão a causar prejuízos à atividade biológica, em termos globais, porém em ambientes restritos, como é o caso das proximidades das grandes cidades industriais, é problema sério, se considerar-se que aliado a estas diminuições, o ar recebe emissões de outros gases, que agravam ainda mais a situação: o ar se torna poluído.

Segundo Oliveira²³ (1966), "Considera-se poluição do ar como as alterações qualitativas ou quantitativas da composição normal do ar que possam acarretar prejuízo à saúde, à segurança e ao bem estar das populações; ocasionar malefícios à fauna e à flora; afetar processos industriais; desperdiçar ou deteriorar matéria-prima; ocasionar prejuízos econômicos diversos, através da deterioração de elementos construtivos, equipamentos e instalações, e da maior necessidade de limpeza em geral".

Outro elemento importante citado, é o solo.

O solo se constitui do delgado manto de rocha decomposta, onde se misturam compostos orgânicos em decomposição, onde se fixam e desenvolvem as plantas terrestres. A par

te mineral, originada por atividade vulcânicas, ou desintegração de rochas causada por ações físicas, químicas e biológicas; e a parte orgânica, originada por queda de folhas e ramos de árvores, assim como restos de animais, excrementos e outros resíduos em decomposição, os quais são transformados por ação de microorganismos consumidores. Constituem-se assim, em uma massa fértil denominada húmus. Do ponto de vista da composição química os solos contêm, geralmente, uma proporção aproximada da ordem de 45% de elementos minerais, 25% de ar e os outros 30% são constituídos de 5% de matéria orgânica e 25% de água⁶.

Os principais ecossistemas encontrados no ambiente de terra firme são as florestas, campos e desertos.

Ao se dirigir a atenção aos usos que se faz da terra, confronta-se com dois problemas principais referentes ao ambiente e ao conforto que, se sabe, são difíceis de resolver.

Os detritos são o subproduto da atividade humana e animal, e subproduto dos costumes, do modo segundo o qual os homens desejam viver e das coisas que querem fazer. Variam desta forma substancialmente de comunidade para comunidade²⁸.

Nas áreas urbanas, industriais e inclusive nas de recreação, o problema é o amontoado de detritos sólidos que têm que ser afastados e/ou eliminados.

Em todas as suas atividades, trabalhador, industrial, lavrador, o homem deixa atrás de si, uma trilha de detritos.

ressantes para os Estados Unidos. Em 1920 uma família média (4 pessoas) gerava 1,2 kg de detritos sólidos por dia. Em 1970 esta cifra passou para 2,4 kg e estima-se que em 1980 seja igual a 3,6 kg. Se forem somados os detritos industriais, a cifra per capita estará próxima de 23 kg por dia. (No Brasil se estima 600 g/hab/dia).

É pois necessário voltar a citar a necessidade de planejar, estabelecer usos do solo. Como o homem moderno de seja usar suas terras de dimensões fixas, para a agricultura, para fins industriais, fins residenciais, para disposição ou eliminação de refugos, para estradas ou sistemas viários, para recreação e até para contemplação, surge o risco de que, à medida que a população aumente, uma forma de uso chegue a afetar outras tantas. Isso torna a política de planejamento dos usos urbanos, regionais e até global da terra, um assunto extremamente complicado. Como todos os assuntos ligados à natureza. E fica provado mais uma vez que não se pode esperar muito de soluções únicas e isoladas.

O terceiro e último dos elementos que se abordou é a água. O terceiro elo da corrente de preocupações que requerem correções múltiplas.

A água é um composto formado a partir de reação química do hidrogênio e oxigênio, na proporção de dois átomos do primeiro, para um do segundo, sendo pois, sua representação, feita através da fórmula química H_2O .

Naturalmente que não se vai encontrar no seu estado livre na natureza, água pura (H_2O), graças a sua imensa capacidade de dissolver substâncias e compostos, sejam eles orgânicos ou inorgânicos.

O planeta Terra possui cerca de 1 bilhão de quilômetros cúbicos de volume, do qual aproximadamente uma quarta parte é constituída de água, ou por outra, existem mais de 250 milhões de quilômetros cúbicos de água que cobrem dois terços de sua superfície total⁵.

Grande parte desta água, em estado livre, forma os mares e/ou oceanos.

Os mares e oceanos não estão a salvo das poluições, pois há muito que servem de depósito de detritos. Naturalmente, suas águas com o seu volume considerável, em relação aos materiais e aos líquidos que nelas são despejados, são capazes teoricamente, ajudadas pelas correntes, ondas e marés, de os misturar e diluir adequadamente.

Deve-se lembrar aqui, que o conceito de poluição, deve sempre envolver concentração e alteração de qualidade, tornando o meio, inclusive a água, impróprio para o fim a que se destina.

Assim é que Amaral e Silva¹ (1975) definiu:

"É preciso atentar para o fato de que um poluente qualquer movimenta-se no sistema de água receptor de várias maneiras, sendo que sua dispersão se dá geralmente por difusão ou por mistura. No trajeto da fonte ao escoadouro, ou ao receptor, aquele material pode ser convertido a outras formas por meio de processos físicos, químicos ou biológicos. O mecanismo global desse fenômeno de transporte, fundamental para a determinação dos efeitos advindos da presença do poluente na água, necessita ser bem visualizado para que se tenha uma ação efetiva de controle sobre as características que desejamos manter ou eliminar para assegurar uma qualidade da água compatível com

o uso para ela definido".

Pois bem, na verdade, ainda que o volume dos mares seja considerável em relação aos despejos que recebem e que teoricamente portanto haja diluição suficiente, sabe-se que mundialmente a poluição dos mares assume proporções de vulto. É conhecido que, frequentemente, há devolução de águas usadas e de detritos de toda espécie. Seus efeitos são muitas vezes imprevisíveis, pois as correntes marinhas, em vez de os arrastarem para o mar alto, os trazem de volta para as costas, quase sempre, a grandes distâncias do ponto de despejo⁹.

Não é somente este o problema, onde o homem é também atingido diretamente, mas, também porque aqueles poluentes podem modificar o equilíbrio dos organismos marinhos, particularmente do plâncton, determinando a proliferação de inúmeras algas, cuja morte tornam as águas pútridas. Naturalmente, como se sabe, existe uma relação entre a composição das associações animais e o grau de poluição, pois certas espécies mais resistentes podem proliferar, exceto em um certo raio em torno do ponto de maior concentração, em zonas onde a fauna e flora são completamente extintas. Os efeitos são muitas vezes consideráveis em relação à pesca, destruindo ou afastando os peixes.

Um tipo de poluição dos mares que muito preocupa, é aquela causada pelos hidrocarbonetos lançados aos mares, acidentalmente ou propositalmente. Aumenta dia a dia, em paralelo com o crescimento da indústria e do transporte de produtos petrolíferos. Essas substâncias, não miscíveis com água, boiam à superfície formando um filme de espessura variável, tendendo para uma camada monomolecular. Tal tipo de poluição é grave pois estes hidrocarbonetos são notavelmente estáveis e

apenas atacados, muito lentamente por um número reduzidíssimo de organismos microbianos, o que lhes garante uma existência prolongada, podendo ser considerada como cumulativa⁹.

Os poluentes que podem ser encontrados no mar, são extremamente numerosos, tais como, detergentes duros, metais pesados, inseticidas, pesticidas e tantos outros, que se poderia estender ainda por muito tempo este assunto. Pode-se destacar dentre eles, todavia, o mercúrio, cujas taxas em certas localidades chegam a ser alarmantes, pelo seu poder residual, que se transmite de animal para animal, e por ser um veneno terrível atuando perigosamente sobre o cérebro, fígado e rins.

Evidentemente, que a poluição das águas também pode ser feita por compostos biodegradáveis, e que suas consequências são também, maléficas. E que junto às costas se constituem em problemas de quase igual gravidade. No entanto, os não biodegradáveis, são cumulativos e não é possível imaginar a amplitude que este problema poderá assumir, ao longo do tempo e espaço.

É preciso considerar no entanto que grande parte da poluição dos mares, é levada pelos rios, que a transportam, dos mais distantes e variados rincões da terra.

Há por conseguinte poluição das chamadas águas doces. E aí talvez residam, em termos atuais, os problemas mais graves da poluição das águas.

Da imensa quantidade de água presente no planeta, a parcela mais facilmente utilizável é a água doce de superfície, que atinge cerca de 42 trilhões de metros cúbicos⁵. Fora esta, ter-se-á que recorrer às reservas de água artesianas, nem sempre presente, e à dessalga de água do mar, ainda não

viável economicamente.

Em certos lugares, até mesmo as águas subterrâneas já foram gravemente poluídas, tanto por detritos orgânicos e químicos espalhados em quantidades excessivamente grandes, quanto por sais que alcançam, sem nenhum tipo de impedimento, o lençol freático.

Dentre as causas da poluição das águas pode-se destacar:

- Poluições químicas com efeitos nocivos brutais, em que os poluentes são produtos tóxicos minerais, tais como, os sais de metais pesados, ácidos, alcalis e os tóxicos orgânicos, por exemplo, os fenóis, hidrocarbonetos, detergentes e outros. Responsável por tal poluição é a atividade industrial de modo geral⁹.

- Poluições químicas crônicas, onde os poluentes são os fenóis, os hidrocarbonetos, produtos fitossanitários (inseticidas e herbicidas), detergentes sintéticos e adubos sintéticos (nitratos). Os responsáveis são as indústrias diversas, principalmente, refinarias e petroquímicas, agricultura, usos domésticos e comerciais⁹.

- Poluições biológicas, onde os poluentes são os detritos orgânicos fermentescíveis, e onde a responsabilidade cabe aos esgotos das coletividades urbanas, indústrias de papel e celulose, indústrias têxteis e alimentares e os cortumes⁹.

- Poluições físicas onde os poluentes podem ser radioativos, resultantes das indústrias nucleares, poluentes mecânicos constituídos de matérias sólidas inertes, tais como lodo, argilas, escórias resultantes de estaleiros, construção

de estradas, indústria de extração, lavagem de minério, dragagem. E ainda poluição térmica, resultante de despejo de água de refrigeração que eleva a temperatura dos rios, sendo os responsáveis, as centrais elétricas, térmicas e nucleares, refinarias e outras atividades industriais⁹.

A poluição dos rios é fenômeno conhecido de há muito. Aristóteles, na antiga Macedônia já se reportou a organismos típicos que se desenvolviam em águas poluídas, hoje conhecidos pelo nome de *sphaerotilus*, e ainda hoje reconhecidos como importantes indicadores de poluição. Trata-se de bactérias consideradas gigantes⁵.

As razões das poluições dos rios se devem a duas ordens de fatos diferentes. A primeira relacionada com o crescimento da população humana e grau cada vez mais elevado de urbanização. A segunda provém do desenvolvimento industrial. As metrópoles formadas, despejam nos rios enormes volumes de águas usadas, não tratadas ou parcialmente tratadas, efluentes dos esgotos domésticos e industriais.

Os casos de águas de esgotos não ou imperfeitamente tratados são muitos, para se ilustrar serão citados alguns casos de rios que se poluíram com tais efluentes.

O Ródano, a jusante de Genebra, na Suíça, periodicamente fica intensamente poluído pelo despejo da barragem de Verbois, onde chegam os esgotos da cidade, cujos efeitos repercutem até Cuboz, 60 km a jusante. O baixo vale do Sena, na França, foi reputado, outrora, pela abundância de seus peixes. Em Quilleboeuf se pescava cerca de 58 espécies diferentes de peixes. Esta rica fauna já desapareceu em consequência da industrialização da região. Deste mesmo rio a água potável dos

parisienses, até o fim do século XVIII, era retirada sem que fosse necessário tratamento; hoje, no verão, o Sena conduz partes equivalentes de água e esgotos. Sabe-se que no século XIX os membros do parlamento britânico ainda pescavam salmão em Londres, na ponte de Westminster sobre o Tâmis. Hoje, não há mais salmão neste rio⁹. O Tâmis é o rio mais importante da Inglaterra, mas um rio de proporções pequenas se comparado aos grandes rios continentais de outras partes do mundo. Até alguns anos atrás, desde a sua entrada em Londres até o seu estuário, além de não ter um só tipo de peixe, apresentava aspecto escuro e oleoso com desprendimento quase permanente de bolhas de gás com intenso odor desagradável. Em 1960 e 1965, entraram em funcionamento duas estações gigantes de tratamento de esgotos, que operadas eficientemente, conseguiram remover grande parte das cargas poluidoras, e que permitiu desde a última data que o rio voltasse a ter algum oxigênio dissolvido, evitando o mau cheiro. Além disso, uma legislação rígida foi colocada em prática, para controlar os efluentes industriais. Hoje, ainda, o salmão, que é muito exigente em teor de oxigênio não voltou, mas o Tâmis possui peixes em toda a sua extensão⁵.

O rio Reno é chamado a grande cloaca da Europa. Ao mesmo tempo, é ele o rio mais importante do continente europeu, tanto sob o ponto de vista econômico como comercial. Possui mais de mil quilômetros de extensão, nasce na Suíça e após passar por outros quatro países, vai desaguar no Mar do Norte. Após nascer nos Alpes Suíços recebendo principalmente água de degelo, segue pela fronteira da Suíça e Áustria. Até o lago Constance, na fronteira da Alemanha, sofre um desnível de 120 metros. Logo a seguir, ainda na fronteira Suíça-Alemanha, forma as cataratas de Schaffhauser, utilizada na produção de energia elétrica. Limita, a seguir a Floresta Negra, entre França e

Alemanha, passando por Strasbourg (França) com uma altitude inferior a 170 metros. Daí para frente, segue em terrenos quase que planos, desenvolvendo-se em meandros, muito dos quais cortados para facilitar a navegação. A seguir, penetra no território alemão, nos platôs da Renânia, margeia inúmeros castelos medievais antes de atingir Bonn, onde se torna profundo e estreito. Logo a seguir, a partir de Colônia, começa a atravessar zonas densamente industrializadas, recebendo ainda o Ruhr e o Lippe, provenientes também de áreas industriais da Westfalia. Do rio Ruhr e Lippe em capítulo posterior se voltará a falar deles, em função de experiências com aeração artificial, realizadas com sucesso. Ao penetrar em território holandês, o Reno se bifurca, formando o Leck e o Waal e, finalmente, ambos desembocam no Mar do Norte⁵.

Para se ter uma idéia da poluição atingida, dizem os especialistas europeus que o rio transporta para a Holanda, em suas águas, diluídos, mais de 15 milhões de toneladas por ano de sais minerais provenientes dos despejos da Suíça, Áustria, França, Luxemburgo e Alemanha⁵.

O rio Ohio, nos Estados Unidos, é o maior tributário do rio Mississipi. Nasce nas imediações da cidade industrial de Pittsburg, na Pensilvânia e após atravessar parte deste estado, torna os limites dos estados de Ohio, Virgínia, Kentucky, Indiana e Illinois, percorrendo uma extensão de mais de mil e quinhentos quilômetros, caindo apenas 130 metros em todo seu percurso, sendo pois um rio que oferece condições muito favoráveis à navegação fluvial. A região do vale do Ohio é muito industrializada, principalmente no que se refere à produção de alumínio, produtos químicos, aço e energia atômica, em consequência o rio encontra-se altamente poluído por despejos indus

dustriais e por esgotos domésticos de uma população estimada em 9 milhões de habitantes. Dois terços destes esgotos domésticos não recebem tratamento e cerca de duas milhões de toneladas de ácido são lançadas ao rio, por ano. Mas, por outro lado, mais de 7 milhões de pessoas são abastecidas com águas provenientes desse rio, sendo frequentes os surtos de moléstias gastro-intestinais⁵.

O rio Tietê em São Paulo, Brasil, nasce a 840 metros de altitude em Pedra Rachada, nos contrafortes ocidentais da Serra do Mar, atravessa o estado de São Paulo, em seu maior comprimento, em uma extensão de 1050 quilômetros e lança suas águas no rio Paranã. Além de importância histórica, ligada aos bandeirantes, possui significado econômico, na produção de energia elétrica, para São Paulo e outros interesses, como navegação, para os municípios situados mais a jusante⁵.

Ao atravessar São Paulo entre seus afluentes recebe o Pinheiros e Tamanduateí. Outrora, todos eles foram piscosos. O grande crescimento demográfico e industrial de São Paulo os tornaram completamente poluídos e mortos. Suas águas, hoje, não permitem sequer recreação, dado o seu péssimo aspecto e odor insuportável.

Uma peculiaridade importante é que a cidade de São Paulo se encontra praticamente às cabeceiras dos rios, e a mais de 700 metros de altitude. Daí a carência de águas para seu abastecimento e também para afastar os seus detritos líquidos, considerando que a região já conta com população por volta dos 12 milhões de habitantes, e é o principal parque industrial da América Latina. É natural que já se esteja importando água de outras bacias hidrográficas para atender à crescente demanda.

O rio Tamanduateí atravessa alguns municípios densamente povoados e altamente industrializados na chamada região do ABC, recebendo todos os resíduos domésticos e industriais, resultantes de suas atividades⁵. Ao chegar ao Tietê e após atravessar bairros populosos e industrializados do município de São Paulo, como Moóca, Brás, Ipiranga, o rio Tamanduateí já se transformou em uma verdadeira vala, a céu aberto, de esgotos puros. O próprio Tietê neste encontro já chega muito poluído, por receber os esgotos da zona leste da cidade e efluentes de outras cidades também industrializadas a montante de São Paulo. Porém, a partir daí, há um agravamento sensível do nível de poluição, e o rio já morto continua recebendo outros lançamentos ao atravessar a parte mais populosa, ou seja, o município da capital, propriamente dito.

O Pinheiros por sua vez recebe esgotos dos bairros populosos de Pinheiros, Butantã, Sto. Amaro. Nestas condições sem oxigênio e com uma carga enorme de matéria em decomposição encontra-se o Tietê, nos dias de hoje.

Por levantamentos realizados, por Branco⁵ (1972), o Rio Tietê ao atravessar a região de São Paulo, recebe uma carga poluidora de mais de 250 toneladas de DBO por dia. Significando que 250 toneladas de oxigênio seriam necessárias à sua estabilização. Se um rio em condições médias de temperatura contém cerca de 8 g de O_2 por metro cúbico de água, na época de estiagem a vazão do Tietê é de 9 m^3 por segundo, ou 800 000 m^3 por dia. A 8 g por m^3 , ter-se-á 6,4 toneladas de O_2 por dia. Seria, pois, necessário que o rio tivesse mais de 40 vezes o seu volume nas épocas de estiagem, para que seu oxigênio fosse suficiente para suprir a demanda. Não tendo sido incluída a reoxigenação por reaeração é necessário incluir, uma intro

dução de mais cerca de 40 toneladas por dia⁵.

Concluindo, se no estado atual a concentração de O_2 é zero e só é possível introduzir-se 40 toneladas por dia, por reaeração, o deficit de O_2 é de cerca de 210 toneladas por dia. Um rio pois nessas condições só pode se recuperar após vários dias, seguindo seu curso para jusante, ou então se o mesmo homem que o poluiu, tratar os seus efluentes nocivos, adotando medidas semelhantes ou análogas às adotadas no Tâmi sa, considerando-se evidentemente as peculiaridades e condições locais.

Não se pretendeu aqui apresentar todo o complexo e a história da poluição, pretendeu-se isto sim, uma uniformidade na metodologia preconizada para o presente trabalho. Ou seja, após uma panorâmica em termos mundiais, abordando-se problemas de ecologia e poluição, e após passar pelas principais áreas da poluição, ar, solo e água, convergir para os principais rios do mundo, incluindo o Rio Tietê, pela sua importância regional e exemplo local, em termos nacionais.

Resta a um rio que já recebeu poluição, apenas uma alternativa, depurar-se. Quando apenas a natureza atuar nesta depuração ter-se-á o fenômeno denominado de auto-depuração dos cursos d'água. Evidentemente, o homem pode ajudar de várias maneiras esta depuração. Uma delas é através de reaeração artificial. Estes assuntos serão devidamente tratados nos próximos capítulos.

3 - Depuração Natural

3 - Depuração Natural

3.1 - Introdução

O aspecto mais importante a ser considerado pelo engenheiro sanitarista, em todo um sistema de esgotos sanitários é a disposição final dos efluentes. É a partir das especificações de qualidade atribuídas ao curso de água receptor, que se opta pelo tipo e grau de tratamento necessário a ser dado às águas residuárias.

Houve época que para se especificar o tratamento apenas prescrevia-se determinada relação de diluição aplicada à vazão do efluente, relacionando a média de 24 horas com a média das vazões mínimas do curso. Porém, a relação de diluição não dá indicação alguma sobre a quantidade de substâncias poluidoras, nem sobre outras prováveis fontes de poluição existentes a montante¹².

Hoje, sabe-se que é também necessário ter uma visão ampla e geral sobre o balanço de oxigênio total do curso da água em estudo, seus afluentes e efluentes. Determinado o balanço de oxigênio de um curso de água, quando recebe uma determinada carga poluidora, pode-se determinar o grau de tratamento necessário a ser atribuído, de modo a se obter um efluente adequado, levando em consideração a proteção à capacidade de autodepuração das águas, mantendo assim a vida aquática e eliminando com segurança outros danos.

O oxigênio dissolvido é uma das grandezas mais importantes e de maior significado na avaliação da qualidade da água²⁶. O equilíbrio ou balanço de oxigênio de um curso de água reporta-se principalmente ao teor inicial ou original de

oxigênio na água antes de receber o poluente, o consumo de oxi
gênio pelos materiais poluidores e o ganho de oxigênio por reaera
ção.

Um conceito bem formado pode ser adquirido ao
se examinar o exemplo fornecido com muita felicidade por Branco⁵ (1972):

"Suponhamos que um rio, com vazão de $10 \text{ m}^3/\text{s}$, este
ja recebendo esgotos de uma comunidade, à razão de 300 l/s ,
esgotos esses que têm uma DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio)
média de 200 mg/l . Temos que $300 \text{ l/s} \times 200 \text{ mg/l} = 60\,000 \text{ mg/s}$,
ou seja, essa cidade lança uma carga poluidora de 60 gramas por
segundo de DBO. A água do rio, quando não poluída e à temperatu
ra média de cerca de 20°C , contém uma concentração de oxigêni
o dissolvido da ordem de 9 mg/l e, com a vazão de $10 \text{ m}^3/\text{s}$,
transporta, pois, $9\,000 \text{ mg/m}^3 \times 10 \text{ m}^3/\text{s} = 90\,000 \text{ mg/s}$, ou seja,
90 gramas por segundo de OD (oxigênio dissolvido). Ora, se
o rio conta com 90 g/s e o despejo lhe rouba 60 g/s , temos que
 $90 \text{ g/s} - 60 \text{ g/s} = 30 \text{ g/s}$, que divididas pela vazão de $10 \text{ m}^3/\text{s}$,
nos dará uma concentração de 3 g/m^3 ou 3 mg/l de oxigênio, a
que ficará reduzido o rio em questão, concentração essa que é
insuficiente para permitir a vida normal de peixes".

"Se, em lugar das 300 l/s de esgotos, a cidade
passar a lançar 500, a carga de DBO passará a ser de 100 g/s ,
que subtraídos dos 90 g/s de oxigênio do rio, dará um saldo
negativo de -10 g/s ou -1 mg/l . É claro que a concentração de
oxigênio não pode ser negativa, será nula; mas, para que o rio
volte às características normais de saturação de oxigênio, isto
é 9 mg/l a 20°C , será preciso fornecer-lhe 10 mg/l e não
apenas 9. Dizemos, então, que o rio apresenta um "deficit" de
saturação de oxigênio de 10 miligramas por litro".

Quando há oxigênio dissolvido na água esta é um meio aeróbio, mesmo que o teor de O_2 seja, baixo. Quando não há oxigênio dissolvido a água se torna um meio anaeróbio. A água natural tende a atingir o seu grau de saturação, que em outras palavras é o grau de solubilidade do oxigênio, em função da altitude, temperatura e grau de salinidade. Após receber um processo de reabilitação incluindo assimilação, decantação, digestão e oxidação, que por fenômenos físicos e bio-químicos envolvidos, causam a demanda de oxigênio. O esforço para readquirir suas características anteriores é chamado de autodepuração⁵. Assim, conclui-se que a autodepuração consiste na eliminação de impurezas com consumo de oxigênio unicamente por atuação da própria natureza.

"Em geral se considera que o fenômeno de autodepuração dos cursos d'água se resume na recuperação do oxigênio perdido, o que não é bem verdade. A depuração consiste, obviamente, na eliminação de impurezas. Assim sendo, ela se inicia logo após o momento em que o rio recebe as descargas poluidoras e inclui todo o processo de assimilação, decantação, digestão e oxidação dos compostos estranhos que lhe foram introduzidos. Vale dizer, pois que as principais consequências ecológicas e nefastas da poluição, como a perda de oxigênio e formação de gases tóxicos, decorrem do próprio processo de autodepuração das águas" Branco⁵(1972).

A recuperação do oxigênio perdido é o que se chama de reaeração. Todas as vezes que um ambiente aquático perde oxigênio este tende a recuperá-lo. Quanto maior, por conseguinte, for o "deficit", maior será a avidez.

A reaeração se processa a partir do ar atmosférico ou da fotossíntese que é realizada por algas existentes no

meio aquático. A película superficial das águas absorve o ar atmosférico que se encontra em imediato contato com ela. Essa absorção é rápida, porém a transferência do oxigênio desta delgadíssima camada superficial, para outras mais profundas processa-se com muita dificuldade e de maneira extremamente lenta, a menos que haja forte agitação e consequente e contínua fragmentação e mistura dessa película enriquecida com o restante da massa líquida. Donde se depreende que rios de alta velocidade e acidentados se recuperam, ou se depuram, mais rapidamente que outros de águas indolentes ou ainda muito mais que as águas paradas das lagoas, a capacidade da corrente é função direta da sua turbulência, a menos que a ação fotossintetizante seja altamente significativa²⁷.

Naturalmente, as águas tranquilas são melhor reoxigenadas por fotossíntese, pois as pequenas velocidades tendem a ocasionar a precipitação de partículas em suspensão, facilitando a penetração da luz indispensável à reação da fotossíntese.

Naturalmente, a depuração realizada em águas tranquilas ou nos lagos, depende fundamentalmente da não existência de sobrecargas orgânicas, assim como da não ocorrência de coloração acentuada. A sobrecarga eliminaria o oxigênio, como efeito da decomposição aeróbia, havendo assim, predominância de alta turbidez e cor, acompanhada de produção de gás sulfídrico e outros compostos tóxicos para as algas¹².

O complexo purificador funciona como um organismo, capaz de ações físicas, químicas e biológicas que garantem que um curso de água que recebe um certo volume de águas residuárias, e tem uma grande demanda de oxigênio possa ter uma DBO decrescente, e a uma certa distância, do lançamento, este

ja novamente clarificado, permitindo assim a penetração da luz, e daí para frente com auxílio da fotossíntese, haja um curso d'água recuperado para a vida aquática.

Após o recebimento das águas residuárias inicia-se o processo de autodepuração. Quando a velocidade das águas do corpo receptor não é muito grande, uma grande parcela da matéria orgânica, não solúvel, tende a precipitar-se no leito dos rios, formando bancos de lodo, onde irá haver decomposição anaeróbia, dada a dificuldade de acesso de oxigênio no seu interior.

A parte da matéria orgânica solúvel terá decomposição com auxílio de bactérias aeróbias, enquanto houver presença de oxigênio, produzindo como subprodutos, o gás carbônico e sais minerais.

Se a carga de matéria orgânica for muito grande, haverá um consumo excessivo de O_2 pelas bactérias aeróbias, que poderá fazer o meio evoluir para a atividade anaeróbia, assim que todo oxigênio da água for extinto. Essa decomposição cederá lugar a ácidos orgânicos, alcoois e metana, que sendo voláteis se desprendem na atmosfera.

É importante notar porém que a penetração de oxigênio atmosférico na massa líquida se dá sempre, em todas as fases, e tanto mais, quanto maior for a avidez. No momento que a concentração de OD se fastia da saturação, diz-se que se formou um deficit de saturação, ou seja, a concentração de OD na água passou a ser inferior à concentração máxima que a água possui a uma certa temperatura. A penetração do oxigênio na água chama-se de reaeração, e a velocidade de penetração dependerá das condições de turbulência da água⁵.

Não se pode esquecer a contribuição significativa

de reoxidação por fotossíntese, quando a cor e a turbidez não estão mais presentes, de modo a impedir a penetração da luz. Aí, há produção de algas devido às altas concentrações de sais minerais e elementos fertilizadores do meio, e por conseguinte a produção de oxigênio poderá ser tão grande que o meio tenderá a uma supersaturação de oxigênio.

"A luz, o oxigênio, a própria decantação e a presença de microorganismos predadores, tais como protozoários, concorrem, também, para a destruição de bactérias e outros seres patogênicos introduzidos no rio pelos esgotos de origem doméstica. A produção de antibióticos, por vários tipos de microrganismos de vida livre, tais como fungos, algas e as próprias bactérias, concorre também para essa depuração biológica" (Branco 1972)⁵.

São estes acontecimentos que têm lugar no rio em etapas sucessivas quer no espaço, quer no tempo que permitem o zoneamento autodepurativo de um rio poluído.

Um rio, pois, pode ser dividido nas seguintes zonas de autodepuração: zona inicial, zona de degradação, zona de decomposição ativa, zona de recuperação e finalmente zona de águas limpas^{2,5,12}. (figura 1)

Figura 1 Zonas de autodepuração de um curso d'água

A zona inicial é aquela em que o curso de água mantém o seu teor do oxigênio inicial ou original, ou seja, a água ainda não recebeu poluentes, tendendo assintoticamente, por tanto, para o seu nível de saturação de oxigênio.

A zona de degradação se estende desde o ponto de lançamento dos poluentes até o ponto em que a taxa de oxigênio dissolvido cai a 40% do nível de saturação.

A água se torna imediatamente turva, de cor acinzentada, havendo precipitação de partículas e consequente formação de depósitos de lodo no leito do rio. Nesta zona, ainda não há lugar para a decomposição aeróbia da matéria orgânica, se houver, será em muito pequena escala. O oxigênio dissolvido é encontrado em concentrações suficientes para permitir a vida dos peixes, mais resistentes, que para aí se dirijam em busca de alimentos. Há grande proliferação de bactérias que progressivamente começam a consumir a matéria orgânica, com consumo de oxigênio, tornando também as águas progressivamente imprôprias aos mistérios da vida. No ponto em que esta concentração atinge 40% da saturação temos o limite oposto desta primeira zona.

A oxidação dos compostos nitrogenados, por ação bacteriana, dá origem a compostos amoniacais que por serem tôxicos aos peixes, os afastam ou os destroem, atingindo porêm maior concentração na zona seguinte.

As algas se tornam pouco a pouco mais raras, aparecem grandes populações de protozoários e certas bactérias de vida livre caracterizando estes ambientes, tais como a Sphaerotilus, de forma filamentosa.

O odor porém não é ativo, uma vez que o oxigênio

não permite a decomposição anaeróbia. Esta apenas principia a realizar-se no interior da massa de lodo que ocupa o leito do rio, dando origem a bolhas de gás.

Onde as cargas poluidoras são pesadas, as águas continuam a perder oxigênio, a medida em que a atividade respiratória bacteriana o vai exigindo. Desta forma, a concentração de oxigênio dissolvido chegará a zero, no momento que esta concentração é inferior a 40% da saturação inicia-se a Zona de Decomposição Ativa.

As águas passam a se apresentar pardacentas. Sua cor varia do cinza escuro ao negro.

No fundo formam-se grandes bancos de lodo, em ativa decomposição anaeróbia, desprendendo grande quantidade de gases malcheirosos, tais como o gás sulfídrico e as mercap^utan^uas que caracterizam o ambiente sêptico. Toda a flora constituída de bactérias e outros seres aeróbios é substituída por outra de seres anaeróbios. O ambiente torna-se escuro e fétido, a superfície da água apresenta-se oleosa e densa.

Essa zona, de depleção severa e início da recuperação (40% até Zero até 40%), pode se estender por muitos quilômetros. Pode-se citar como exemplo o Rio Tietê, que é sêp^utico durante toda a extensão da cidade de São Paulo, prolonga-se pelo Rio Pinheiros e torna boa parte da represa Billings, através do sistema Light, também sêptica.

Uma vez consumida grande parte da matéria orgânica, o oxigênio tende a ser repostado.

Nesta zona, não há condições para proliferação de algas, pois a cor é intensamente escura.

O número de bactérias decresce e volta a recrudescer a jusante do ponto crítico. Se desenvolvem as miríades de protozoários que se alimentam também de bactérias.

Após o ponto crítico o meio principia e torna-se mais claro em virtude de a maior parte das partículas já se haver precipitado e a maioria dos compostos orgânicos solúveis e coloidais, responsáveis pela cor, já ter sido oxidada. O teor de oxigênio eleva-se até os 40% de saturação novamente, mas o amiente é impróprio à vida de peixes dada a alta concentração de amônia. Nos 40% acontece um ponto de inflexão na curva de oxigênio e que marca o início da Zona de Recuperação, que sob muitos aspectos se caracteriza por fenômenos opostos aos que definem a Zona de Degradação.

Pode-se pois caracterizar a Zona de Recuperação, como aquela que inicia-se com 40% da saturação e termina com as águas novamente saturadas de oxigênio. O teor de matéria orgânica decresce, assim, como a concentração de bactérias recrudescidas e também dos protozoários que se alimentam de bactérias. As águas paulatinamente se clarificam, até se tornarem límpidas, permitindo a proliferação de algas que contribuem ativamente para a reoxigenação do meio. A amônia é oxidada totalmente por bactérias que a transformam sucessivamente em nitritos e nitratos, importantes nutrientes que em conjunto com os fosfatos presentes, permitem o desenvolvimento de um número de algas muito superior ao existente no rio no seu estado original, antes da poluição. A água atinge uma coloração esverdeda intensa. Uma infinidade de organismos já visíveis a olho nu, como pequenos crustáceos, larvas de insetos, vermes e moluscos se nutrem de seu alimento ideal, as algas, os quais, por sua vez, são o alimento ideal predileto dos peixes que começam

a aparecer,, e podendo atingir grandes populações na zona seguinte.

A zona seguinte é a zona que caracteriza o rio recuperado, ou seja, suas águas estão depuradas. É comumente chamada de Zona de Águas Limpas, ainda que impropriamente, pois, as águas estarão eutrofizadas, com uma superpopulação de algas chegando as vezes a ficar espessa, como uma sopa. A água passa a ter agora uma população de seres vivos como nunca teve antes, mesmo antes de haver sido poluída.

O equilíbrio volta a acontecer quando o curso d'água recebe outros afluentes, que com a diluição diminuem a eutrofização e conseqüentemente, progressivamente a população de algas.

Pode-se dizer que finalmente o curso d'água está recuperado, ainda que as suas características iniciais não possam mais ser atingidas. Nesta zona porém, o nível de oxigênio tende para a saturação, conforme figura 1.

3.2 - Formulação Matemática

A capacidade de reaeração de um corpo de água é função direta da turbulência, e muitas tentativas para formular um modelo matemático expressivo têm sido feitas, a primeira que se conhece foi apresentada em 1911 em New York por Black e Phelps, citados por Tsivogloy e Neal²⁷. Em 1925, Streeter e Phelps propuseram um modelo empírico, que segundo Tsivogloy e Neal²⁷, foi profeticamente proposto, considerando-se a época e que por este mesmo motivo foi seguido por O'Connor e Dobbins, Churchill e col., Langhein e Durum, Krenkel e Orlob, Thackston e Krenkel e outros²⁷.

A fórmula empírica segundo Streeter e Phelps é ainda sem dúvida, a de maior utilização na prática, e tem sido a melhor aceita que qualquer outra formulação proposta³.

Segundo Benedict e Carlson³, no intervalo de 0° a 35°C , a formulação empírica de Streeter e Phelps, apresenta um erro inferior a 10 por cento. Existem muitas tentativas para eliminar esta mínima diferença. As outras formulações mais modernas e mais atualizadas, tornaram-se quase sempre muito complicadas distanciando-se bastante do gosto, e da preferência dos especialistas.

No nosso meio, utilizam-se, quase que exclusivamente as formulações devidas a Streeter e Phelps. Justificado pela simplicidade e facilidade de aplicação diante de outras formulações mais modernas²¹.

Acrescente-se, pois, que aliado ao fator simplicidade, está a qualidade de resultados, altamente satisfatórios, uma vez que erros inferiores a 10%, são quase sempre irrelevantes, e pouco ou quase nada alteram o produto final, dos trabalhos.

Diante deste raciocínio, cujos argumentos são plenamente defensáveis, julgou-se infrutífero abordar outros métodos de avaliação. Discutir-se-á, assim, apenas o método mais simples de larga (0° a 35°) e maior utilização, cujos resultados são qualitativamente muito bons, ou seja, a formulação de Streeter e Phelps.

Não se pode desprezar o advento e o uso cada vez maior de computadores na obtenção de novos modelos, porém, quase sempre trata-se da busca de parâmetros desprezados pela formulação de Streeter, não invalidando assim os argumentos

anteriormente expostos, uma vez que os resultados finais serão sensivelmente semelhantes.

É conveniente introduzir, neste momento, a terminologia básica envolvida no chamado balanço do oxigênio, segundo Streeter e Phelps.

É importante notar que coerentemente, optou-se aqui, pela não apresentação de um algebrismo muito intenso, uma vez que isto se afasta completamente das finalidades deste trabalho. Li¹⁹ (1962) reproduziu a dedução matemática da formulação de Streeter e Phelps, utilizando-se de 26 (vinte e seis) passagens algébricas artificiosas, envolvendo cálculo diferencial e integral.

Ao invés disto, optou-se por caminhos bem mais simplistas, utilizados por outros autores que, da mesma forma, a isso não se propunham.

É geralmente aceito que a absorção do gás pelo líquido é proporcional ao "deficit" de oxigênio, segundo a equação de primeira ordem, que se segue:^{17,22}

$$\frac{dD_2}{dt} = - K_2 D \quad 3.1$$

onde:

D_2 = é o deficit de oxigênio em mg/l

k_2 = coeficiente (constante) de reaeração por dia

t = tempo de percurso, em dias.

Por outro lado, a demanda bioquímica de oxigênio (DBO), ou a desoxigenação do meio, pode ser expressa como

uma reação monomolecular, como se segue^{17,22}:

$$\frac{dL}{dt} = K_1 L$$

3.2

onde:

L = é a DBO em mg/l

K_1 = coeficiente (constante) de desoxigenação por dia

t = tempo de percurso, em dias.

O balanço de oxigênio (Monteiro 1975) dissolvido em um curso d'água, simplificadoamente, poderá ser representada pela figura 2²¹.

Figura 2 Curva da depressão de oxigênio

Sendo:

L_0 = a DBO inicial do primeiro estágio do curso d'água, após a mistura do despejo, em S_1 .

D_0 = o "deficit" inicial do oxigênio dissolvido - diferença entre a concentração de saturação e a concentração existente.

O_2 = oxigênio.

S_1 = Secção 1 do curso d'água considerado.

S_2 = Secção 2 do curso d'água considerado.

Algebricamente é o mesmo que:

$$3.1 + 3.2 = \frac{dD_2 + dL}{dt} = (-K_2 D + K_1 L) = \frac{dD}{dt} \quad 3.3$$

Onde:

D = deficit instantâneo (em um instante t) resultante de OD.mg/l

Antes de integrar a equação 3.3 utiliza-se do seguinte artifício matemático:

A concentração da matéria orgânica, expressa em termos de DBO do primeiro estágio, deve estar expressa em termos de L_0 . Ou seja:

$$L = L_0 10^{-k_1 t} \quad 3.4$$

A equação 3.4 foi baseada no chamado método clássico ou "log difference". Trata-se da equação representativa da estabilização da demanda bioquímica de oxigênio (DBO), co

mo visto, considerada uma reação monomolecular²¹.

Assim, segundo Li¹⁹, tem-se:

$$D = \frac{K_1 Lo}{K_2 - K_1} 10^{-K_1 t} - \frac{K_1 Lo}{K_2 - K_1} 10^{-K_2 t} + D_0 \times 10^{-K_2 t} \quad 3.5$$

ou:

$$D = \frac{K_1 Lo}{K_2 - K_1} (10^{-K_1 t} - 10^{-K_2 t}) + D_0 10^{-K_2 t} \quad 3.6$$

Os símbolos empregados apresentam os mesmos significados já mencionados, onde K_1 refere-se a DBO apresentada em log base 10 e k_2 é coeficiente de reaeração também em log base 10.

Os valores de Lo e D_0 são obtidos indiretamente a custo de análises de laboratório. O tempo t de percurso da água entre as secções S_1 e S_2 , pode ser obtido determinando-se a velocidade média do curso d'água no trecho considerado e medindo-se a distância entre S_1 e S_2 . Onde se obterá $t = \frac{e}{v}$ (dias).

Para se efetuar o cálculo de K_1 através da equação 3.4, é fundamental que não se tenha no trecho em estudo, entre S_1 e S_2 , lançamento de novos despejos e, ainda, que a velocidade do curso de água não seja, em nenhuma secção, inferior a velocidade de sedimentação da matéria orgânica, ou seja, 0,18 m/s²¹.

Na prática adota-se o valor de K_1 , obtido de uma média de diversas determinações, de preferência realizadas em épocas de estiagem.

Como ilustração apresenta-se um exemplo de es

timativa do valor de K_1 , segundo Monteiro²⁷(1975):

$$L_0 = 33 \text{ mg/l} \quad (20^\circ\text{C})$$

$$L = 30 \text{ mg/l} \quad (20^\circ\text{C})$$

$$\text{Velocidade média do curso d'água} = v = 0,28 \text{ m/s}$$

$$\text{Comprimento do trecho} = e = 5\,500 \text{ m}$$

Figura 3 Trecho de um rio de extensão "e".

$$t = \frac{e}{v} = \frac{5500}{0,28 \times 86400} = 0,23 \text{ dias} \quad 3.7$$

utilizando-se a equação 3.4

$$L = L_0 \cdot 10^{-k_1 t}, \text{ tem-se}$$

$$\frac{L}{L_0} = 10^{-k_1 t} \quad 3.8$$

ou:

$$\log L - \log L_0 = K_1 t \log 10 \quad 3.9$$

$$\therefore K_1 = \frac{\log L_0 - \log L}{t \times \log 10} \quad 3.10$$

Substituindo-se os valores conhecidos:

$$K_1 = \frac{\log 33 - \log 30}{0,23 \times 1} = \frac{1,5185 - 1,4771}{0,23} = 0,18/\text{dia} \quad 3.11$$

$$\therefore K_1 = 0,18/\text{dia} \quad (20^\circ\text{C}) \quad 3.12$$

Por muito tempo, admitiu-se que K_1 fosse relativamente constante com a variação da concentração da matéria orgânica nos corpos d'água, apresentando valor médio de 0,1/dia. Posteriormente, verificou-se que para lançamentos predominantemente domésticos, K_1 varia de 0,07 a 0,3/dia a 20°C , ou ainda 0,07 a 0,25/dia a 20°C , admitindo-se 0,17/dia como valor médio. Mais recentemente, é que se sabe que K_1 aumenta proporcionalmente com a concentração da matéria orgânica na água²¹.

É sabido que o calor aumenta a atividade bacteriana e, conseqüentemente o K_1 . Essa variação pode ser determinada pela fórmula que se segue²¹:

$$(K_1)_T = (K_1)_{20^\circ} \times (1,045)^{T-20} \quad 3.13$$

onde:

$$(K_1)_T = \text{o valor de } K_1 \text{ a } T^\circ\text{C}$$

$$T = \text{temperatura qualquer de estudo } (^\circ\text{C})$$

$$(K_1)_{20} = \text{valor de } K_1 \text{ a } 20^\circ\text{C}$$

Supondo-se, pois, que a partir de 3.12 se queira conhecer K_1 para 15°C , tem-se:

$$(K_1)_{15} = 0,18 \times (1,045)^{15 - 20} = 0,18 \times (1,045)^{-5} \quad 3.14$$

$$(K_1) \cong 0,15/\text{dia} \quad 3.15$$

O coeficiente de reaeração " K_2 ", tem a sua magnitude, dependente principalmente de:

- deficit de oxigênio observado no curso d'água
- diferença entre a concentração de saturação e a concentração existente
- da temperatura
- da turbulência, que por sua vez, é função da velocidade e profundidade do curso d'água.

São muitas as fórmulas matemáticas propostas para avaliar o coeficiente de reaeração K_2 , entre elas, temos:

A equação de Owens, Edwards e Gibbs, citado por Monteiro²¹ (1975).

$$(K_2)_{20} = 2,3 V^{0,67} / H^{1,85} \quad 3.16$$

onde:

V = velocidade média em época de estiagem, do curso d'água (m/s)

H = profundidade média em época de estiagem, do curso d'água (m)

ou a equação de O'Connor (Monteiro)²¹:

$$(K_2)_{20} = 1,71 \times V^{0,5} / H^{1,5} \quad 3.17$$

onde V e H apresentam os mesmos significados já mencionados.

A equação 3.16 melhor se apresenta para os limites:

$$0,03 \leq V \leq 1,5 \text{ (m/s)} \quad 3.18$$

$$e \quad 0,12 \leq H \leq 3,30 \text{ (m)} \quad 3.19$$

e a equação 3.17 é utilizada para:

$$0,5 \leq V \leq 0,5 \text{ (m/s)} \quad 3.20$$

$$0,30 \leq H \leq 9,0 \text{ (m)} \quad 3.21$$

Naturalmente aplicando-se uma e outra fórmula os resultados obtidos não serão iguais, mesmo nos intervalos coincidentes e é por este motivo, que se recomenda certo cuidado, evitando-se estimativas precipitadas para K_2 . No nosso meio a equação 3.16 é sempre a mais utilizada. Porém só a prática pode indicar um melhor caminho.

Supondo-se $V = 0,12 \text{ m/s}$ e $H = 1,2 \text{ m}$ teríamos por 3.16:

$$K_2(20) = 2,3 \times 0,12^{0,67} / 1,2^{1,85} \quad 3.22$$

$$K_2(20) \approx 0,39/\text{dia} \quad 3.23$$

A prática, no nosso meio, tem conduzido a valores de K_2 compreendidos entre 0,09 e 4,3/dia. É naturalmente, rios com velocidades reduzidas apresentam baixos valores para K_2 , e ao contrário, os rios com velocidades de escoamento elevadas apresentam valores de K_2 elevados.

A temperatura influencia no valor de K_2 , e essa influência pode ser expressa por:

$$(K_2)_T = (K_2)_{20} \times (1,024)^{T - 20} \quad 3.24$$

$$(K_2)_{20} = \text{valor de } K_2 \text{ a } 20^\circ\text{C}$$

$$T = \text{temperatura qualquer de estudo } (^\circ\text{C})$$

exemplo:

$$(K_2)_{15^\circ} = 0,39 \times (1,024)^{-5} \quad 3.25$$

$$(K_2)_{15^\circ} = 0,34/\text{dia} \quad 3.26$$

Pode-se concluir que tanto K_1 , como K_2 crescem com a temperatura, e/ou decrescem juntamente com ela.

Após o ponto de lançamento inicia-se a depressão de oxigênio, até atingir um máximo, e posteriormente, inicia-se a recuperação. (figura 2)

O tempo decorrido entre o instante do lançamento e a máxima depressão de oxigênio é chamado de tempo crítico " t_c ".

O tempo crítico é dado pela equação^{19,20,21}:

$$t_c = \frac{1}{K_2 - K_1} \log \frac{K_2}{K_1} \left[1 - \frac{D_o (K_2 - K_1)}{L_o K_1} \right] \quad 3.27$$

Conhecido o tempo crítico, pode-se calcular o deficit crítico através da equação²¹:

$$D_c = \frac{K_1}{K_2} \times L_o \times 10^{-K_1 t_c} \quad 3.28$$

Naturalmente que com as expressões 3.6, 3.27 e 3.28 é possível equacionar quase a totalidade dos problemas de autodepuração, relacionados com a variação dos níveis de oxigênio dissolvido nos cursos d'água.

4 - Aeração Artificial

4.1 - Introdução

Como foi visto no capítulo anterior, a capacidade de autodepuração de um curso de água poluído, a uma certa temperatura, assim como o tratamento aeróbio dos esgotos está diretamente relacionado com a capacidade que possui o sistema de transferir oxigênio do ar para o interior da massa líquida. Por essa razão, rios turbulentos e acidentados têm maior capacidade de autodepurar-se que os rios tranquilos de planície.

Baseados neste conceito, foram idealizados por Pasveer, citado por Imhoff¹², os sistemas de tratamento denominados valos de oxidação, que constituem verdadeiros modelos reduzidos de rio, nos quais a reaeração é obtida através de turbulência provocada artificialmente por intermédio de agitadores superficiais, neste caso, geralmente em forma de escovas cilíndricas, rotativas, de eixo horizontal, chamadas de escovas de Kessener. A movimentação do líquido se processa em circuito fechado, impelida pelo rotor.

Uma alternativa desse método seria evidentemente, a de se instalar aeradores nos próprios rios, vindo a constituir efeitos de verdadeiras cachoeiras artificiais.

Sempre que o teor de oxigênio dissolvido de um corpo de água ameaçar cair abaixo dos limites pré-estabelecidos, tendo em vista os usos a que se destinam suas águas, pode-se interferir de modo a evitar ou atenuar este malefício, através da aeração artificial. Esta operação poderá ser efetuada com os mesmos equipamentos utilizados no processo de tratamento por

lodos ativados, portanto, quer pulverizando a água acima da superfície ou então injetando ar abaixo da mesma, como será visto a seguir¹².

Historicamente, pode-se citar que a primeira aeração artificial de rios foi através de injeção de ar comprimido. Foi relatada por Tyler em 1946, nos Estados Unidos, segundo Imhoff¹², em aplicação no rio Flambeau em Wisconsin. Posteriormente, inúmeros trabalhos foram desenvolvidos em várias partes do mundo, notadamente nos Estados Unidos e na Alemanha, principalmente na segunda, onde se destacam os estudos no Rio Lippe e Ruhr. Outros trabalhos, além destes, mencionam trabalhos realizados na Inglaterra, Suécia e Polônia²⁴.

No Brasil, uma experiência, desse tipo, em escala piloto e com sucesso satisfatório, foi realizado em São Paulo, no Rio Pinheiros, pelos engenheiros Pera e Rodrigues²⁴, trabalho apresentado no 39 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária, Curitiba, 1965.

Como foi dito, anteriormente, com o rápido crescimento da população e da indústria nos últimos trinta anos, a quantidade de esgotos lançados aos cursos de água assumiu proporções assustadoras, em todo o mundo. Apesar da construção de várias estações de tratamento, o teor de matéria orgânica de muitos dos rios aumentou de tal forma que a concentração do oxigênio caiu abaixo dos limites permissíveis (3 - 4 mg/l), em certos casos até se anulou.

Para evitar ou minorar tais inconvenientes tem sido utilizado cada vez mais o recurso de aeração artificial das águas superficiais, como tratamento complementar. Inúmeros especialistas elaboraram nestes últimos anos trabalhos de toda

sorte, fazendo recomendações e formas de utilização dos processos de aeração artificial¹⁶.

4.2 - O "deficit" de oxigênio

Muitos são os fatores que causam a depressão do oxigênio, conforme já foi visto e que resumidamente podem ser reunidos no que se segue:

- 4.2.1 Despejos de esgotos dos emissários públicos e estações de tratamento, resíduos industriais.

O oxigênio é consumido por decomposição aeróbia dos resíduos.

- 4.2.2 Aquecimento motivado pelo despejo de água de resfriamento, especialmente das usinas termoelétricas.

A elevação da temperatura da água acelera os processos de decomposição e a demanda de oxigênio é acelerada ou aumentada.

- 4.2.3 Consumo adicional causado pelo lodo depositado e referente a demanda bentônica.

- 4.2.4 Fenômenos de extratificação térmica ou de aumento de velocidade de fundo causando agitação e arraste do lodo decantado no fundo do curso de água.

Os efeitos também já vistos, destacam-se por,

diminuïrem a capacidade de autodepuraçãõ, uma vez que se as bactérias aeróbias não dispõem de suficiente oxigênio, o processo é substituído por processo anaeróbio, originando lodos sêpticos e putrefaçãõ das águas, com produçãõ de odores desagradáveis.

As águas superficiais não mais podem continuar a ser utilizadas para consumo público ou industrial, com a conseqüente modificaçãõ de suas condições físicas, químicas e bacteriológicas. A potabilizaçãõ da água é dificultada ou torna-se proibitiva.

A fauna e flora aquáticas diminuem e podem até desaparecer. Deixando, assim, tais águas de cumprir suas múltiplas finalidades a serviço da comunidade, principalmente para abastecimento, recreaçãõ e lazer.

4.3 - Princípio da Aeraçãõ

Conforme é aplicado em tratamentos de água, o termo "aeraçãõ", pode ser definido como um processo pelo qual a água é colocada em íntimo contato com um gás, usualmente o ar atmosférico, com o propósito de transferir (ou câbiar) substâncias voláteis para (ou da) a água. Estas substâncias podem incluir o oxigênio, o dióxido de carbono, nitrogênio, gás sulfídrico, metana e vários outros compostos orgânicos voláteis não identificados, responsáveis por sabor e odor. Entretanto, a aeraçãõ encontra sua maior e destacada aplicaçãõ, na introduçãõ principalmente do oxigênio e liberaçãõ de dióxido de carbono¹⁰.

O propósito básico da aeraçãõ é a melhoria, direta ou indireta, das características físicas, químicas e bio

lógicas da água, para utilização pública e outras destinações¹⁰.

"Também aplicado em rios e lagos, o processo de introduzir oxigênio dissolvido, geralmente chamado de reaeração ou reoxigenação, é fundamentalmente o mesmo processo de aeração usado em uma estação de tratamento e pode ser visto como um caso especial de absorção de gás. Em água poluída, o mecanismo é o mesmo, porém mais complexo, pois é acompanhado por demanda de oxigênio pelos poluentes"¹⁰.

4.4 - Quando aerar artificialmente

Conclusivamente a aeração, no caso de águas poluídas, não pode ser vista como solução individualizada e suficiente para eliminar outras intervenções necessárias, de tratamento. Com a finalidade de manter um balanço de oxigênio favorável nas águas receptoras, os esgotos devem receber algum tratamento (a ser estudado), em estações depuradoras ou de tratamento, antes do seu lançamento. A aeração superficial deve ser vista e indicada como um meio complementar rápido, para introduzir a quantidade de oxigênio necessário na água, para evitar ou pelo menos minorar os inconvenientes da depressão do oxigênio.

Ainda que a aeração tão mais eficiente, quanto mais baixo o teor de oxigênio da água, quanto maior, portanto, for sua avidéz¹², não se deve esquecer que nos processos tradicionais de tratamento, a aeração comparece sempre classificada como tratamento secundário²⁰, onde se exige maior tratamento (ou oxidação) do efluente.

Pode-se, portanto, aerar artificialmente rios quando a diluição resultante apresentar depressão de OD, mas

não colapso total. Pode-se apontar que o sucesso das experiências conduzidas em São Paulo, nos Rios Pinheiros e Tietê não foram totais, mas apenas satisfatórios, exatamente por se tratar de um caso de colapso total. Em casos como este, ainda que a avidez de oxigênio seja muito grande, e a eficiência da introdução seja a melhor possível, os resultados práticos não apresentam a mesma performance. Se por um lado se introduz taxas elevadas de OD, por outro lado, se aumenta a DBO por revolver o lodo de fundo ao difundí-lo na massa líquida. Melhora-se a situação geral mas não resolve o problema.

Em casos de poluição maciça para que os resultados sejam realmente satisfatórios em todos os pontos de vista, inclusive como efeito prático, o enquadramento como tratamento secundário é absolutamente necessário. Desta forma, no caso de São Paulo é importante que as grandes obras em andamento para despoluir seus rios prossigam, e haja retenção e separação da matéria sólida dos efluentes que serão lançados aos rios. É importante lembrar que o efluente do tratamento primário é ainda muito rico em matéria orgânica e tem uma DBO muito elevada.

A aeração artificial de rios para São Paulo se apresenta como indicada após o tratamento primário, se considerarmos que as estações de tratamento existentes, como ETEs Pinheiros e Vila Leopoldina não mais permitem expansões, por falta de áreas disponíveis nas regiões onde foram construídas. E que portanto não poderão passar de simples ETEs primárias, para seus respectivos portes. Não tentando profetizar para as outras que estão sendo construídas na área urbana, pode-se dizer que se não forem tomadas todas as precauções, aquelas unidades terão o mesmo destino. São os casos das ETEs de Suzano e a de São Caetano, no ABC.

Resumindo a aeração é desejável quando a diluição permite que o processo de depuração seja acelerado, sem os inconvenientes do "deficit", já apontados. Não deixando de considerar que não se deve buscar grande eficiência de equipamento, versus oxigenação, mas sim, eficiência de oxigenação, versus efeito prático. Nos subcapítulos que se seguem serão estudados os vários processos existentes. Seus efeitos práticos, porém, devem ser analisados, pelo leitor, à luz dos argumentos apresentados.

4.5 - Finalidade da aeração artificial. Localização

A finalidade da aeração artificial é manter um determinado e permitido teor mínimo de oxigênio ($C_{\min}$) no rio.

É necessário determinar a distribuição em tempo e espaço do teor de oxigênio ao longo do rio, para se conhecer tanto o valor limite de O_2 , assim como os locais apropriados para a implantação de equipamentos de aeração. Isto é feito, medindo e traçando o perfil longitudinal do oxigênio em distintas épocas do ano, nas várias estações, com distintas vazões, distintas temperaturas e condições de carga. (fig.4).

Figura 4 Perfil de O_2 de um rio

Justifica-se que o ponto km_j é o local mais indicado para se instalar o aerador, porque, é o local de menor concentração de O_2 , ainda compatível com o mínimo exigível, e é o ponto onde o equipamento apresentará maior eficiência, conforme já foi visto, maior "deficit", corresponde a maior eficiência.

A esquerda de km_j ter-se-ia eficiência menor do equipamento, e a direita ainda que maior a eficiência, se teria um certo trecho abaixo do teor permissível.

Após a colocação do aerador espera-se a situação que pode ser vista na figura 5.

Figura 5 Perfil de O_2 após a aplicação do aerador

Considerando que as oscilações da concentração de oxigênio do rio podem mascarar a determinação do perfil, é necessário determinar cada um de seus pontos com verificações locais resultantes de vários dias de observação.

Analisando as oscilações periódicas, registradas, são obtidos os pontos de mínimo teor de oxigênio do perfil.

Nestes pontos críticos devem ser feitas observações contínuas durante um maior período de tempo para obter suficientes dados sobre a magnitude das concentrações críticas e a relação entre o teor de oxigênio, a vazão e a temperatura do rio.

Naturalmente, dada a extrema importância de se ter um perfil confiável, é recomendável que aquelas determinações contínuas sejam realizadas com instalações de controle automático⁸.

Colocando-se em gráfico, as concentrações de oxigênio C_o , em relação ao tempo t , são obtidas curvas que permitem visualizar a variação de C_o em relação não só à temperatura, mas também à variação de vazão Q , ao longo do tempo, se estas duas grandezas estiverem registradas e relacionadas com cada ponto. Em geral, o teor de O_2 diminui com vazões decrescentes e temperatura crescente, supondo-se a carga poluidora instantânea constante⁸. (figura 6).

A uma temperatura constante, as menores concentrações são obtidas em águas pouco profundas e de baixa velocidade, podendo coincidir ou não com a vazão mínima. Devendo-se principalmente ao fato de que a menor vazão ocorre em tempo seco, mas que pode coincidir com uma radiação solar inten

sa e uma grande ação fotossintética do plancton, enquanto que as vezes, vazões pouco maiores, coincidem com precipitações pluviiais, maior quantidade de águas residuárias lançadas aos rios, incluindo as chamadas primeiras águas, resultado da lavação natural das ruas, e ainda, céu encoberto⁸.

Figura 6 Concentração de O_2 em função do tempo

Observando estas curvas, desde que confiáveis, e fruto de medições sistemáticas, é possível determinar com que frequência o teor de oxigênio será menor do que um determinado limite, sem aplicação de medidas corretivas e em quantos dias do ano, deverá ser utilizado o sistema de aeração artificial⁸.

Suficientemente informado, o projetista pode concluir pelo desenvolvimento da figura 5, em situação alternativa e necessária, de localização de aeradores, para que estes cumpram fielmente sua finalidade de manter um determinado e permitido mínimo de oxigênio. (figura 7).

Figura 7 Alternativa de localização de aeradores

Da figura 7 pode-se concluir que a escolha do equipamento também ficará a cargo do projetista, que considerará entre outras coisas se é conveniente usar uma única bateria de aeradores, ou várias em pontos determinados, de modo inclusive a subdividir a potência instalada dos motores especificados.

4.6 A escolha do equipamento

Muitos são os tipos de equipamentos que se prestam a aeração artificial, algumas considerações serão tecidas a respeito, no sentido de propiciar critérios para a sua escolha.

4.6.1 Tipo Turbina

As melhores experiências com os aeradores tipo

turbina foram feitas no Rio Ruhr, que entre outros usos, se presta como manancial de água para abastecimento da região industrial da Alemanha Ocidental.

Os motores conjugados às unidades de turbina usualmente são operados de 1200 a 1800 RPM, acoplados com um redutor de velocidades que reduz para 30 ou 50 RPM¹³.

O processo consiste em aproveitar uma usina hidroelétrica "tipo bulbo", instalada e introduzir ar comprimido através de uma tubulação, em um ponto situado imediatamente acima do plano superior ao rotor da turbina¹³. (figura 8).

Figura 8 Turbina instalada no Rio Ruhr

Fonte: Imhoff¹³

Injetando 3000 Nm³/h a geração de energia decresceu de 1080 para 937 kw. Com este valor e uma carga estática de 8 a 7 m foi calculado que a vazão de água, decresceu de 0,70 m³/s (substituído pelo ar), que equivale a energia potencial de 47 kw¹³.

Nota: Nm³ = m³ a 20°C e a 760 mm de Hg.

Um teste foi feito em setembro de 1966, com 53% de deficit de oxigênio, outro em outubro com 26%. Outros foram ajustados em torno dos 50%. A maior eficiência foi obtida entre 3000 e 3500 Nm³/h. Nesta marca, 0,9 kg de O₂ pode ser dissolvido por kwh¹³.

A relação ar-água situou-se ao redor de 1:15, possibilitando a introdução de 3000 Nm³ ar/h. A capacidade de introdução de oxigênio foi de 120 kg O₂/h, para um deficit de oxigênio de 50%¹³.

Considerando-se as perdas ocorridas na produção de energia da turbina, mais o consumo de energia para a introdução de ar para 50% de deficit de O₂, a eficiência foi de 1kg O₂/kwh, e para 100% de deficit de oxigênio, esta chegou a 2kg O₂/kwh. Valores estes indiscutivelmente muito favoráveis, explicáveis pelo grande tempo de contato das bolhas de ar na zona de águas turbulentas, formadas no canal de fuga da turbina¹³.

Este tipo de aeração ainda que muito eficiente, só tem sentido de ser incluída como alternativa técnica e econômica se houver no curso de água em estudo, turbinas operando com outras finalidades, tal como, hidroelétrica existente. Seus custos de implantação são muitíssimo mais altos que de qualquer outro tipo de aerador.

Como sistema alternativo Imhoff¹¹ (1962) utilizou a injeção de oxigênio puro, ao invés de ar, mas concluiu que o ar comprimido ainda era mais vantajoso, em virtude do adicional do custo do O₂ puro, em cotejo com o ganho de eficiência do sistema, a figura 9 indica as modificações introduzidas.

Figura 9 Introdução de O_2 puro

Fonte: Imhoff¹¹

4.6.2 Aeração com ar comprimido

Esta outra forma de aeração de rios foi utilizada pela primeira vez para aeração do rio Lippe¹³.

O sistema consistiu de um pontão flutuante, atravessando o rio em toda a sua largura, no qual foram montados tubos perfurados, para a formação de bolhas. A pressão utilizada foi de 4 a 5 atmosferas¹³.

Foram injetados $12\,000\text{ Nm}^3$ de ar/h a 1 metro de profundidade¹³.

Com 50% de deficit de O_2 foram introduzidos $30\text{ kg } O_2/\text{h}$, com uma eficiência de $0,60\text{ kg } O_2/\text{kwh}$. Com 100% de deficit de O_2 , ao redor de $60\text{ kg } O_2/\text{h}$, com uma eficiência de $1,2\text{ kg } O_2/\text{kwh}$ ¹³.

Como não poderia deixar de ser, os sólidos grossos, em suspensão, carregados pelas águas causaram inúmeras dificuldades neste pontão flutuante. Inclusive os tubos verticais necessariamente colocados para alimentar os tubos distribuidores atuavam como grades de retenção.

A solução foi eliminar o pontão.

Futuramente as dificuldades surgidas com o pontão puderam ser evitadas com o uso de mangueiras de aeração submersas.

As mangueiras são dotadas de orifícios variáveis de 0,5 mm a 0,7 mm de diâmetro, e nelas são colocados pesos, para que permaneçam apoiadas no leito do rio.

Sistemas como estes foram usados no Rio Ruhr e Rio Lippe, na Alemanha. Com 2000 Nm^3 de ar por hora foi possível introduzir $28 \text{ kg O}_2/\text{h}$, com uma eficiência de $0,69 \text{ kg O}_2/\text{kwh}$ com 50% de deficit de O_2 ¹³.

A experiência tem mostrado que os resultados são tão piores quanto maiores forem as bolhas de ar.

O maior inconveniente das mangueiras, é que as mesmas não podem ser tiradas de operação, pois se tornam facilmente obstruídas por areias ou lodos. Os problemas de operação e manutenção não recomendam este processo de aeração¹³.

4.6.3 Aeradores de superfície (superficiais)

Os aeradores de superfície destinados a aeração de rios, são montados sobre unidades flutuantes de modo a permitir que o equipamento, acompanhe a flutuação do nível de água,

do curso de água. Mantendo, assim, o equipamento ao abrigo de inundação e também mantendo fixa uma das características importantes de dimensionamento, ou seja, a submersão dos rotores¹³.

O aerador é composto basicamente de um motor de eixo vertical elétrico, ou a explosão, podendo ser diesel ou gasolina, um redutor de velocidade e um rotor¹³, conforme pode ser visto nas figuras que se seguem.

É importante notar que apesar das características gerais serem comuns, alguns detalhes construtivos, ou físicos, variam de fabricante, para fabricante.

O equipamento flutuante é fixado por meio de cabos ligados às bordas dos flutuadores e estes às margens do rio. É possível a ligação entre muitos flutuadores. As ligações entre os flutuadores admitem regulagem, o que permite o ajustamento e distribuição dos aeradores, sobre a superfície do curso de água.

Os cabos permitem ainda a instalação ou a remoção dos aeradores, com maior facilidade.

No caso da instalação de mais de um aerador deve-se prever os rotores girando em sentidos opostos, a fim de se obter concordância de rotação dos volumes aerados. Na prática, constituem os denominados sistemas engrenados.

A seguir apresenta-se uma série de figuras, onde procura-se ilustrar alguns tipos de aeradores superficiais, existentes.

Figura 10 Planta e elevação de um aerador flutuante

Figura 11 Cortes e detalhes

Fonte: Filsan (Filstar)

Como se pode observar o rotor do equipamento tipo, apresentado, é fechado. A seguir se poderá ver detalhes de equipamentos de outro fabricante. Neste caso, os rotores são abertos.

Figura 12 Planta e elevação

Figura 13 Ampliação - detalhe motor e rotor

Fonte: Barbarã

A seguir apresenta-se uma das variantes encontradas para rotores, do tipo aberto.

Figura 14 Rotor aberto com pás

Fonte: Barbarã

A escolha de um rotor deve principalmente considerar a potência instalada.

É normal se encontrar recomendações dos fabricantes, que definem tipos de rotores mais adequados para as várias faixas de potência, requerida.

Existem, pois, os mais variados tipos de rotores mas basicamente o princípio do sistema como um todo é sempre o mesmo. O motor deve ser do tipo fechado, para funcionamento ao tempo e os redutores devem ser de alta eficiência mecânica, o eixo vertical e mancais devem ser dimensionados para resistir a esforços radiais e axiais.

No rio Ruhr foram colocadas unidades flutuantes,

tocadas a motores diesel de 150 cv¹³.

Com 50% de "deficit" de O_2 foram introduzidos 41 kg O_2 /h, com uma eficiência de 0,66 kg O_2 /kwh. Valores similares foram obtidos no Rio Lippe¹³.

4.6.4 O Custo dos Sistemas

O custo relativo aos três sistemas de aeração foram estudados e comparados por Imhoff¹³ (1969) e são apresentados na Tabela 1.

O capital inicial para o tipo turbina se apresenta reduzido, porque evidentemente só se considerou as adaptações que se deve introduzir ao sistema, para que este passe a atuar como aerador, não foram portanto, como é óbvio, considerados os custos de capital para a implantação da usina.

A tabela original foi apresentada em Marcos Alemães que após sua correção monetária para a data atual, foram transformados em cruzeiros. Como indicador e referência, forneceu-se o valor do UPC (Unidade Padrão de Capital), do período outubro a dezembro de 1978. UPC = Cr\$ 303,29.

Tabela 1 Cotejo técnico e econômico

Discriminação		Sistema Turbina	Aerador de superfície	Ar com primido
Capital	(Cr\$)	532015	1486512	1032735
Capacidade de oxigenação	(kg/h)	120	41	28
Relativa ao custo de capital	(Cr\$/kg O_2 /h)	4430	35989	36772
Energia Consumida	(kwh/kg O_2)	0,98	1,52	6,60
Custo Total	(Cr\$/kg O_2)	2,19	7,98	15,49

Fonte: Imhoff¹³ (1969)

Os fatores de correção monetária e o valor para conversão em cruzeiros foram obtidos junto ao Consulado Geral da República Federal da Alemanha, ou seja, sobre o valor de 1969 foi aplicado o fator 1,4225 e o valor do Marco Alemão utilizado foi: a cada Marco correspondeu Cr\$ 11,00.

4.6.5 Considerações Complementares

Tendo em vista os resultados apresentados anteriormente nota-se que com exceção dos aeradores tipo turbina, onde se desprezam os custos com a implantação da usina, os aeradores de superfície são os mais favoráveis sob o aspecto técnico e econômico. Especialmente se for lembrada a facilidade com que podem ser transportados sobre a corrente, facilitando o ajuste prático no local a instalar, e a facilidade, dependendo da época e da conveniência ou necessidade, de se promover a incorporação de oxigênio de modo uniforme e distribuído sobre toda a largura do rio.

4.7 Dimensionamento do equipamento

Com base nas experiências adquiridas em vários rios da Alemanha Kalbskopf¹⁴ (1973) propôs a seguinte fórmula para cálculo do aerador.

$$P(kw) = \frac{Q \Delta Co \cdot 3600 \cdot Cs}{Eo \cdot 1000 \cdot (Cs - CL)} \quad 4.2$$

onde:

Q = vazão do rio (m^3/s)

ΔCo = Acréscimo necessário de oxigênio para atingir $Comin$, (g/m^3). Ver figura 5.

E_o = Eficiência da oxigenação, em $\text{kg O}_2/\text{kwh}$, para 100% do deficit de O_2 . (Este valor é fornecido pelo fabricante do equipamento escolhido)

C_s = Teor de oxigênio na saturação (g/m^3)

C_L = Teor de oxigênio no curso de água (g/m^3)

Entre as várias fórmulas apresentadas pelos diversos autores consultados^{7,13,14,15,29}, escolheu-se a equação 4.2, porque a mesma vem ao encontro de toda a conceituação apresentada, anteriormente, e todos os seus termos tem os mesmos significados já amplamente discutidos.

No capítulo 4.5 entre os conceitos analisados, apresentou-se o parâmetro ΔC_o , que na aplicação da equação 4.2, deve ser adotado de forma tal, que o teor mínimo de oxigênio, seja sempre atingido, ou superado.

4.8 Conclusões

Ao finalizar-se, reporta-se principalmente, ao fato de que a aeração de cursos de água, não pode e não deve ser vista como uma solução auto-suficiente, para proceder o tratamento de águas poluídas, independente da concentração de poluentes. Foi dentro deste espírito que se desenvolveu o sub-capítulo 4.4, e se procurou demonstrar quando é útil se aerar artificialmente.

Procurou-se ainda naquele item deixar suficientemente claro, que as grandes obras em andamento em São Paulo, são fundamentais para o caso do Rio Tietê e afluentes. E foi realçado o fato de que aeração deve ser vista como sendo no mínimo um tratamento secundário.

Outra conclusão fundamental é que mais importante que visar a eficiência do equipamento, versus oxigenação, é considerar eficiência de oxigenação, versus efeito prático.

Em termos de Brasil, onde não existem usinas hidroelétricas "tipo bulbo", os aeradores tipo turbina não são indicados, e ficou demonstrado que o tipo mais versátil e mais viável técnica e economicamente é o aerador de superfície.

Ao encerrar-se, reforça-se o propósito de ter-se apresentado um trabalho que não teve a pretensão de indicar uma solução definitiva e perfeita, mas, isto sim, única e conscientemente fornecer subsídios para outros que se prestam ao árduo trabalho de combater a poluição das águas.

Se este trabalho tiver que ser considerado pequeno, tendo em vista a grandeza dos problemas, do contexto em que está incluído, que não seja visto como uma migalha, mas sim como uma semente, para que germine, cresça e possa dar frutos, e que direta ou indiretamente colabore com saúde pública ambiental.

5 - Referências Bibliográficas

5 - Referências Bibliográficas

1. AMARAL E SILVA, C.C. Poluição e Atividades humanas. In: CURSO de poluição das águas. São Paulo, CETESB, 1975. cap.3, p.1-16.
2. AZEVEDO NETTO, J.M. de & HESS, M.L. Tratamento de águas residuárias. São Paulo, DAE, 1970. /Separata da Rev. DAE, nºs 46-68 / .
3. BENEDICT, A.H. & CARLSON, D.A. Rational assessment of the Streeter Phelps temperature coefficient. Wat Poll. control Fed., 46: 1792-1799, 1974.
4. BRANCO, S.M. Conceito, definições, classificação. In: AZEVEDO NETTO, J.M., dir. Lagoas de estabilização. São Paulo, Faculdade de Saúde Pública da USP, 1967. cap.3, p.1-5.
5. BRANCO, S.M. Poluição: a morte de nossos rios. Rio de Janeiro, Ao livro Técnico, 1972.
6. BRANCO, S.M. Ecologia. São Paulo, CETESB, 1978.
7. BUELTMAN, C. et. al. Power requirements for oxygen transfer with turbine aerators. Int. Air Wat Poll., 5: 175-9, 1963.
8. CHURCHILL, M.A. et. al. The prediction of stream reaeration rates. Proc. Amer. Soc. civ. Engrs, 88 (SA4,1): 1-46, 1962.
9. DORST, J. Antes que a natureza morra. São Paulo, Ed. Edgard Blücher / Ed. USP, 1973.

10. HANEY, P.D. Theoretical principles of aeration. J. Amer. Wat. Wks Ass., 46: 353-76, 1954.
11. IMHOFF, K.R. Pure Oxygen aeration in the Ruhr River. Wat. Poll. control Fed., 49: 1959-67. 1962.
12. IMHOFF, K.R. Manual de tratamento de águas residuárias. São Paulo, Ed. Edgard Blücher Ed. USP, 1966.
13. IMHOFF, K.R. Oxygen balance and artificial re-aeration of Lake Baldeney and the Louwer Ruhr. Adv. Wat. Poll. Res., p.761-73, 1969. / Separata /.
14. KALBSKOPF, K.H. Generalidades sobre aeração de rios na Alemanha. Germany, 1973, p.1-10./Tradução mimeografada- Separata/.
15. KALINSKE, A.A. Power consumption oxygenation and mixing. Int. J. Air Wat. Poll., 5: 157-68, 1963.
16. KOTHANDARAMAN, V. Effects of contaminants on reaeration rates in river water. Wat. Poll. control Fed., 43: 806-17, 1971.
17. KRENKEL, P.A. et. al. Turbulent diffusion and the reaeration coefficient. Proc. Amer. Soc. civ. Engrs, 88 (SA2,1): 53-83, 1962.
18. LEGISLAÇÃO sobre o controle da poluição do meio ambiente. São Paulo, CETESB, 1978.
19. LI, W.H. Unsteady dissolved-oxygen sag in a stream. Proc. Amer. Soc. civ. Engrs, 88 (SA3,1):75-85, 1962.
20. LINSLEY, K.R. & FRANZINI, J.B. Engenharia de recursos hídricos. São Paulo, Ed. USP / Ed. MacGraw Hill, 1978.

21. MONTEIRO, C.E. Autodepuração dos corpos d'água. In: CURSO de poluição das águas. São Paulo, CETESB, 1975. cap.6, p.1-36.
22. O'CONNOR, D.J. Effects of surface active agents on re-aeration. Int. J. Air Wat Poll., 5: 123-31, 1963.
23. OLIVEIRA, W.E. Fundamentos do problema da poluição do ar. In: SEMINÁRIO SOBRE POLUIÇÃO DO AR, São Paulo, 1966. São Paulo, Faculdade de Saúde Pública da USP, 1966. cap.1.1, p.1-6.
24. PERA, A.F. Notícia sobre um programa de estudos relacionados com a aeração artificial das águas dos rios Tietê e Pinheiros na cidade de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, 39, Curitiba, 1965. Anais. Curitiba, 1965. p.5-20.
25. SÃO PAULO: o drama urbano. City News, São Paulo, 2 jul. 1973.p.44.
26. SLACK, W.V. Average dissolved oxygen-measurement and water quality significance. J. Wat.Poll.control Fed., 43: 433-44, 1971.
27. TSIVOGLU, E.C. & NEAL, L.A. Tracer measurement of reaeration: III. predicting the reaeration capacity of inland streams. J. Wat.Poll. control Fed., 48: 2669-89, 1976.
28. WARD, B. & DUBOS, R. Uma terra somente. São Paulo, Ed. Edgard Blücher, 1973.
29. WESTON, R.F. & STACK JR., V.T. Fundamentals of operation of entrainment aerators. Int. J. Air Wat.Poll., 5: 149-56, 1963.