



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E ARQUITECTURA
SECÇÃO DE HIDRÁULICA E DOS RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAIS
LICENCIATURA EM ENGENHARIA CIVIL

SANEAMENTO AMBIENTAL I

NOÇÕES SOBRE QUALIDADE DA ÁGUA

EDUARDO RIBEIRO DE SOUSA

LISBOA, SETEMBRO DE 2001



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E ARQUITECTURA
SECÇÃO DE HIDRÁULICA E DOS RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAIS
LICENCIATURA EM ENGENHARIA CIVIL

**PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO
DE UMA MASSA DE ÁGUA**



1. INTRODUÇÃO

Quando substâncias ou impurezas, de origem orgânica ou inorgânica, estão presentes numa água conferem-lhe determinadas propriedades ou características que é importante conhecer para que se possam escolher, por exemplo, o tratamento a que é necessário submetê-la para abastecimento público, ou para avaliar os níveis de poluição de massas de águas naturais.

Segue-se uma apresentação das características ou os parâmetros físico-químicos e biológicos ou bacteriológicos que permitem fazer o *diagnóstico* de uma massa de água, sob o ponto de vista qualitativo.

2. CARACTERÍSTICAS ORGANOLÉPTICAS

As características organolépticas compreendem a cor, o cheiro e o sabor. A origem da cor apresentada pelas águas naturais deve-se, isoladamente ou em conjunto, às seguintes causas:

- origem natural inorgânica, devida à presença de compostos metálicos, principalmente de ferro e de manganês;
- origem orgânica, animal ou vegetal;
- origem industrial, devida à descarga de efluentes industriais (têxteis, pasta de papel, refinarias, indústrias químicas).

É usual definir dois tipos de cor: a aparente e a verdadeira. A cor aparente é a coloração da água tal como ela se apresenta, isto é, com todas as matérias em suspensão. A cor verdadeira é aquela que a água apresenta uma vez removidas as matérias em suspensão. O facto de uma água não se apresentar límpida, não significa que ela esteja isenta de produtos tóxicos ou perigosos.

O cheiro, segundo RODIER, pode definir-se como:

- o conjunto de sensações apreendidas pelo sentido de olfacto quando se está em presença de certas substâncias voláteis;
- a qualidade de cada sensação particular ou individualizada provoca da por cada uma daquelas substâncias.



A existência de cheiro e de sabor numa água pode ser, como no caso da cor, um sinal de poluição ou da presença de matéria orgânica em decomposição. Qualquer destas características são subjectivas e, consequentemente, difíceis de medir.

3. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS

Serão tratadas as características que se consideram mais relevantes, e que são as seguintes:

- Temperatura;
- Turvação;
- Sólidos totais;
- pH;
- Acidez e alcalinidade;
- Dureza;
- Oxigénio dissolvido;
- Carência de oxigénio;
- Azoto;
- Cloretos.

3.1 TEMPERATURA

A temperatura é um parâmetro de grande importância, dado que tem influência na velocidade das reacções químicas, na solubilidade dos gases, na taxa de crescimento dos microrganismos, entre outras.

3.2 TURVAÇÃO

A designação de uma água turva é aplicada às águas que contenham matérias em suspensão, as quais interferem com a passagem da luz através da água. A turvação pode ser causada por uma enorme variedade de matérias em suspensão, de origem orgânica ou inorgânica, as quais variam desde partículas coloidais até sólidos de certas dimensões. No caso de lagos e albufeiras ou noutras massas de água paradas, a maior parte da turvação é devida a partículas coloidais. Pelo contrário, em rios em condições de cheia, a maior parte da turvação é devida a partículas de certa dimensão.



3.3 SÓLIDOS TOTAIS

Com rigor, toda a matéria, com excepção da água contida em líquidos, é classificada como material sólido.

No entanto, analiticamente a concentração total de sólidos (sólidos totais) numa água é definida como a matéria que permanece como resíduo após evaporação de 103 a 105 °C. Os sólidos totais, ou o resíduo após evaporação, podem ser divididos em sólidos em suspensão e sólidos filtráveis. Usualmente o filtro é escolhido de tal forma que o diâmetro mínimo dos sólidos em suspensão é cerca de 1 micron (μ). A fracção dos sólidos em suspensão inclui os sólidos sedimentáveis que decantam após um período de 60 minutos.

A fracção dos sólidos filtráveis é constituída por sólidos coloidais e dissolvidos. Os sólidos coloidais incluem as partículas, com um diâmetro aproximado compreendido entre 1 milimicron e 1 micron (Fig. 1). Os sólidos dissolvidos incluem moléculas orgânicas e inorgânicas que estão em solução na água.

Cada uma das categorias referidas podem, ainda, ser classificadas de acordo com a sua volatilidade a 600 °C. Esta classificação destina-se a averiguar as parcelas orgânica e inorgânica dos sólidos totais.

À temperatura de 600 °C, a parte orgânica dos sólidos volatiliza e a parte inorgânica permanece sob a forma de cinzas. Assim, são definidos os sólidos em suspensão voláteis e os sólidos em suspensão fixos como sendo, respectivamente, a parcela orgânica e inorgânica dos sólidos totais.

3.4 pH

A concentração do ião hidrogénio $[H^+]$ é um parâmetro de qualidade muito importante das águas naturais e das águas residuais porque o seu valor determina todos os equilíbrios que se estabelecem numa água. A forma usual de expressão da concentração do ião hidrogénio é o pH, cuja definição é a seguinte:

$$pH = - \log_{10} [H^+] \quad (0 \leq pH \leq 14)$$

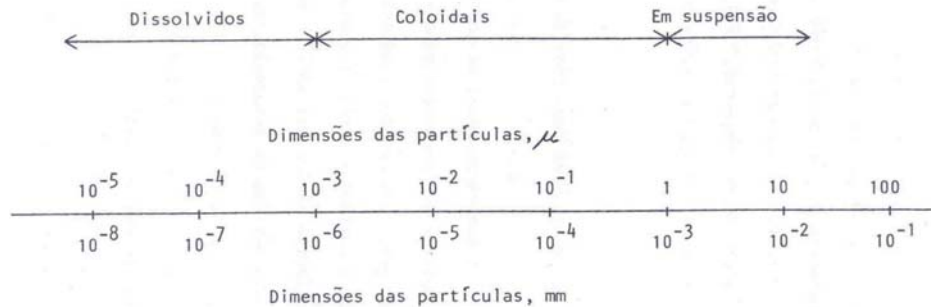


Fig. 1 - Classificação e gamas das dimensões das partículas.

Consoante os valores do pH, as águas classificam-se em:

- águas ácidas, cujos valores do pH são menores do que 7;
- águas neutras, cujo valor do pH é igual a 7;
- águas alcalinas, cujos valores do pH são maiores do que 7.

O pH, para além de controlar a maior parte das reacções químicas na natureza, controla, também, e a actividade biológica é, na maior parte dos casos, apenas possível para valores de pH compreendidos em 6 e 8.

3.5 ACIDEZ E ALCALINIDADE

A acidez de uma água é principalmente devida à presença de anidrido carbónico (CO_2) dissolvido, o qual pode ser proveniente da atmosfera ou da matéria orgânica (animal ou vegetal) com que a água contacta.

Sob o ponto de vista de saúde pública, a acidez tem relativamente pouca importância. Refira-se que muitos dos refrigerantes consumidos contêm muito mais anidrido carbónico do que a água potável, sem que esse facto provoque qualquer doença a quem os bebe.



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E ARQUITECTURA
SECÇÃO DE HIDRÁULICA E DOS RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAIS
LICENCIATURA EM ENGENHARIA CIVIL

No entanto, uma água ácida afecta a conservação de sistemas de saneamento básico e o funcionamento biológico de estações de tratamento de águas residuais. Assim, quando são utilizados processos de tratamento biológico há necessidade de manter os valores do pH entre 6 a 9,5. Além disso, uma água ácida ataca, por corrosão, as canalizações e os reservatórios.

Define-se alcalinidade de uma água como a sua capacidade de neutralizar ácidos. A alcalinidade das águas naturais é devida, principalmente, a sais de ácidos fracos, embora possam contribuir também bases fracas e fortes.

Embora muitas substâncias possam contribuir para a alcalinidade de uma água, a maior parte desta característica nas águas naturais é devida aos hidróxidos (OH^-), carbonatos (CO_3^{2-}) e bicarbonatos (HCO_3^-). De todas estas substâncias, as que aparecem em maior quantidade nas águas naturais são os bicarbonatos, que se formam em virtude da passagem de águas contendo anidrido carbónico (águas ácidas) pelos calcários.

Tal como a acidez, também a alcalinidade é pouco importante, sob o ponto de vista da saúde pública. No entanto, as águas alcalinas, principalmente as que possuem hidróxidos, são desagradáveis ao paladar e, por isso, pouco apreciadas pelo homem.

3.6 DUREZA

Em geral, designam-se águas duras aquelas que exigem muita quantidade de sabão para produzir espuma ou que dão origem a incrustações nas tubagens de água quente, nas panelas ou noutros equipamentos, nos quais a temperatura da água é elevada. Forma-se, o que se designa em linguagem corrente a "pedra das panelas". Embora com o aparecimento dos detergentes o problema da dureza, no que respeita ao consumo de sabão, tenha perdido o seu impacto, o mesmo já não se poderá dizer quanto às incrustações.

A dureza das águas naturais varia consideravelmente de lugar para lugar, sendo em geral a dureza das águas superficiais menor do que a das águas subterrâneas. A dureza de uma água reflecte a natureza das formações geológicas com as quais ela esteve em contacto.

A dureza (em geral expressa em mg/L de carbonato de cálcio CaCO_3) de uma água é devida à presença de catiões metálicos bivalentes principalmente cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}). Uma



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E ARQUITECTURA
SECÇÃO DE HIDRÁULICA E DOS RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAIS
LICENCIATURA EM ENGENHARIA CIVIL

água dura é, portanto, aquela que contém grande quantidade de cálcio e magnésio. Estes iões metálicos bivalentes estão, em geral, associados com o anião bicarbonato (HCO_3^-), sulfato (SO_4^{2-}), cloreto (Cl^-) e nitrato (NO_3^-).

No entanto, é habitual distinguir-se entre dureza temporária (ou carbonatada) e dureza permanente (ou não-carbonatada). A primeira é devida ao cálcio e ao magnésio que se encontram ligados aos bicarbonatos, e que são eliminados quando a água é fervida. A dureza permanente é devida ao cálcio e ao magnésio que se encontram associados aos sulfatos, cloretos, nitratos, etc., e que não são eliminados quando a água é fervida.

3.7 OXIGÉNIO DISSOLVIDO

Todos os organismos vivos estão dependentes, de uma forma ou de outra, do oxigénio para manter a actividade metabólica que produz energia para o crescimento e para a reprodução.

Nas massas de água, a solubilidade do oxigénio depende de diversos factores, dos quais se salientam a pressão atmosférica, a temperatura e a salinidade. À medida que a temperatura e a salinidade aumentam a solubilidade do oxigénio diminui. A baixa solubilidade do oxigénio na água limita a capacidade de auto-depuração das águas naturais, o que torna necessário o tratamento das águas residuais antes da sua descarga nos meios receptores (linhas de água, lagos, naturais ou artificiais, e oceanos).

O teor em oxigénio dissolvido de uma água varia consoante a origem destas. Assim, enquanto as águas superficiais não poluídas podem conter quantidades apreciáveis de oxigénio, muitas vezes em condições de sobre-saturação, as águas subterrâneas profundas só contêm geralmente alguns mg/L.

As variações dos teores de oxigénio dissolvido são de grande importância, principalmente nos casos de diminuição. Como se referiu, um aumento da temperatura conduz a uma diminuição do teor em oxigénio dissolvido porque diminui a sua solubilidade e aumenta o número de microrganismos consumidores de oxigénio.



3.8 CARÊNCIA DE OXIGÉNIO

Ao longo dos anos, têm sido desenvolvidos um certo número de testes para a determinação da quantidade de matéria orgânica numa água natural ou residual. Um desses métodos, como se viu, é medir a percentagem de sólidos voláteis dos sólidos totais, mas dado que está sujeito a uma grande margem de erro não é o indicador mais correntemente utilizado.

Presentemente, os métodos ou testes mais utilizados são os seguintes:

- Carência bioquímica de oxigénio (CBO);
- Carência química de oxigénio (CQO);
- Valor ao permanganato ou oxidabilidade (VP);
- Carbono orgânico total (COT).

A carência bioquímica de oxigénio representa o oxigénio consumido pelos microrganismos na oxidação da matéria orgânica numa determinada água em condições aeróbias. Como este processo de oxidação é, ainda assim, numa certa lentidão, convencionou-se tomar, como parâmetro representativo do teor em matéria orgânica numa água, o valor da CBO ao fim de cinco dias de incubação, a 20 °C (CBO_5^{20}).

A carência bioquímica de oxigénio, correspondente à oxidação bioquímica total da matéria orgânica, designa-se por carência última de oxigénio (CUO ou CBO_u). Dada a importância deste teste, mais tarde apresentam-se, com maior detalhe, os conceitos relativos a este assunto.

O teste da carência química de oxigénio mede a quantidade de oxigénio necessária para oxidar quimicamente, em determinadas condições, a matéria orgânica presente numa água. Para este efeito, o oxigénio equivalente à matéria orgânica é medido pela utilização de um agente oxidante químico forte como o dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$).

Dado que alguns compostos inorgânicos podem interferir com o teste, há que ter o cuidado prévio de os eliminar. Este teste é particularmente útil para medir a matéria orgânica em águas residuais industriais e domésticas que contenham compostos tóxicos para os microrganismos.

O teste do valor ao permanganato ou oxidabilidade tem objectivos semelhantes ao da CQO, mas o agente oxidante químico utilizado é o permanganato de potássio (K_2MnO_4), um oxidante menos forte do que o dicromato de potássio e, por isso, a oxidabilidade não tem tanta sensibilidade como



o CQO.

Finalmente, o teste do carbono orgânico total, que se aplica especialmente para águas com baixos teores de matéria orgânica, consiste na sua combustão rápida em aparelho especial e a altas temperaturas. Neste caso, o carbono orgânico é totalmente oxidado ou convertido em anidrido carbónico, cuja medição é feita através de um analisador de infravermelhos.

3.9 AZOTO (ver Ciclo de Nutrientes)

Este elemento é essencial para os sistemas biológicos, de tal forma que o tratamento biológico de águas residuais não pode ter êxito se não existir azoto suficiente para o desenvolvimento dos microrganismos. Sob o ponto de vista de engenharia do ambiente, existem as seguintes formas de azoto:

- azoto orgânico: azoto sob a forma de proteínas, amino-ácidos e ureia.
- amónia: azoto sob a forma de sais do ião amónia (NH_4^+), como por exemplo $(\text{NH}_4)_2 \text{CO}_3$, ou de amónia livre.
- nitritos (NO_2^-): azoto que corresponde a um estágio intermédio de oxidação, não existindo normalmente em grandes quantidades dado que é bastante instável.
- nitratos (NO_3^-): azoto que corresponde a um produto final de oxidação.

O azoto orgânico é determinado pelo método Kjeldahl, segundo o qual a amostra é primeiramente fervida com o objectivo de lhe retirar a amónia presente, a que se seque uma digestão. Durante esta digestão, o azoto orgânico é convertido em amónia.

O azoto Kjeldahl total é determinado de uma forma idêntica à do azoto orgânico, mas em que a amónia presente não é retirada antes da digestão. Consequentemente, a azoto Kjeldahl total representa a soma do azoto orgânico e da amónia. Os nitritos e os nitratos são determinados por métodos colorimétricos.

3.10 CLORETOS

Os cloretos das águas naturais resultam da lixiviação das rochas e dos solos com as quais as águas contactam, e nas zonas costeiras, da intrusão salina. As águas de montanha contêm, em



geral, baixos teores de cloretos, enquanto que as águas subterrâneas e de rios apresentam concentrações elevadas. Para além disso, as águas residuais das actividades agrícolas, industriais e domésticas constituem uma outra fonte de cloretos.

No controlo da qualidade das águas, relativamente aos cloretos, interessa mais saber se este valor se mantém constante do que o seu valor real, desde que este não exceda 600 mg/L, valor considerado, pela Organização Mundial da Saúde (OMS), como máximo admissível para abastecimento público.

4. CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS E BACTERIOLÓGICAS

4.1 INTRODUÇÃO

Neste parágrafo, serão apresentados os principais grupos de organismos existentes nas águas naturais e nas águas residuais, os microrganismos patogénicos e microrganismos utilizados como indicadores de poluição e o seu significado.

Os grupos principais de organismos presentes nas massas de água podem ser agrupados conforme se apresenta no Quadro 1.

Para a síntese de novas células um organismo necessita ter uma fonte de energia e de carbono (Quadro 2), para além de elementos inorgânicos, principalmente azoto e fósforo, e outros tais como enxofre, potássio, cálcio e magnésio.

As duas fontes mais correntes de carbono para os microrganismos são o anidrido carbónico (CO₂) e a matéria orgânica. Se um organismo utiliza como fonte de carbono o anidrido carbónico, então é designado por autotrófico. Pelo contrário, se um dado microrganismo utiliza o carbono orgânico como fonte de carbono, então é designado por heterotrófico.

No que respeita à fonte de energia utilizada na síntese de novas células, os organismos autotróficos podem, ainda, ser divididos em foto-autotróficos e quimio-autotróficos.

QUADRO 1 - AGRUPAMENTO DOS MICRORGANISMOS PELOS TRÊS REINOS

| Reino | Membros representativos | Caracterização |
|-------------------------|---|--|
| Animal | Rotíferos Crustáceos | } Multicelulares, com diferenciação de tecidos |
| Plantas | Musgos Fetos Plantas de semente | |
| Protistas Superiores | Algas Protozoários Fungos Bolors | } Unicelulares, sem diferenciação de tecidos |
| Inferiores | Algas verdes-azuis Bactérias | |

**QUADRO 2 - CLASSIFICAÇÃO DOS MICRORGANISMOS DE ACORDO COM AS FONTES DE ENERGIA
E CARBONO PARA A SÍNTESE CELULAR**

| Classificação | Fonte de energia | Fonte de carbono |
|-------------------------------|--|------------------|
| Autotróficos (produtores) | | |
| Foto-autotróficos | Radiação (solar) | CO ₂ |
| Químio-autotróficos | Reacção inorgânica de oxidação-redução | CO ₂ |
| Heterotróficos (consumidores) | Reacção orgânica de oxidação-redução | Carbono orgânico |



No primeiro caso, a energia é fornecida via luz solar através do processo de fotossíntese; no segundo, a energia é fornecida através das reacções inorgânicas de oxidação-redução. Finalmente, para os microrganismos heterotróficos a fonte de energia provém da oxidação ou fermentação da matéria orgânica.

4.2 PROTISTAS

Os protistas constituem um dos mais importantes grupos de organismos, no domínio da qualidade da água, em especial as bactérias, as algas e os protozoários.

As bactérias desempenham um papel fundamental na decomposição e na estabilização da matéria orgânica, quer nas massas de água naturais, quer nos tratamentos biológicos de águas residuais. As bactérias coliformes são indicadores de poluição de origem fecal.

As algas podem constituir um sério problema para as águas superficiais, dado que, sob condições favoráveis ao seu crescimento, elas podem desenvolver-se rapidamente cobrindo as linhas de água, as superfícies de lagos e albufeiras. Este desenvolvimento anormal de algas é, em geral, característico dos chamados lagos ou albufeiras eutróficas, isto é, aqueles que apresentam teores elevados dos compostos necessários ao crescimento biológico.

Dado que os efluentes de estações de tratamento de águas residuais domésticas contêm concentrações elevadas de nutrientes, as descargas dos seus efluentes em massas de água naturais podem dar origem ao fenómeno de eutrofização, ou seja, um desenvolvimento excessivo de algas e plantas.

Para além disso, a presença de algas afecta o valor dum dada origem para abastecimento público, uma vez que estas causam problemas de gosto e cheiro à água. A presença de algas pode, também, alterar o valor das águas superficiais para o desenvolvimento de certas espécies de peixes e de outro tipo de vida aquática, para recreio e para outros usos.

Os protozoários desempenham, também, um papel importante, dado que se alimentam de bactérias e de outros protistas microscópicos e são essenciais na operação de processos de tratamento biológico e na purificação de linhas de água, porque mantêm um equilíbrio natural entre as diferentes espécies de microrganismos.



4.3 PLANTAS E ANIMAIS

O conhecimento destes organismos é útil para a avaliação das condições das massas de água, para a determinação da toxicidade dos efluentes de águas residuais rejeitadas no ambiente e para a observação da eficácia da vida biológica em estações de tratamento de águas residuais.

4.4 MICRORGANISMOS PATOGÉNICOS E COLIFORMES

Os microrganismos patogénicos, a maior parte deles provenientes do lançamento em massas de águas naturais de águas residuais comunitárias, são, em geral, rejeitados por indivíduos doentes ou portadores sãos.

As bactérias patogénicas mais comuns são a *Salmonella typhi* e a *Salmonella paratyphi*, responsáveis pela febre tifóide e paratifóide, respectivamente, a *Shigella spp*, causadora de desintérias bacilares, e o *Vibrio cholera*, responsável pela cólera.

Embora as bactérias patogénicas sejam as mais numerosas, não são os únicos microrganismos patogénicos presentes nas águas residuais e naturais. No Quadro 3, apresenta-se uma listagem dos principais organismos patogénicos que podem estar presentes na água.

Dado que a identificação dos microrganismos patogénicos é difícil e dispendiosa, é habitual considerar a contagem de bactérias coliformes (coliformes totais, coliformes fecais, *E. Coli* e estreptococos fecais) como um indicador da presença de microrganismos patogénicos e de águas residuais de origem fecal.

Cada pessoa rejeita, em média, 2×10^9 coliformes/dia. Se se admitir uma capitação de 100 L/hab.dia, a ordem de grandeza da contagem de coliformes é, assim, de 2×10^6 coliformes/100 ml⁽¹⁾, o que representa um número bastante elevado. A presença de coliformes numa água é tomada como uma indicação de que possam existir microrganismos patogénicos. Ao contrário, a não existência de coliformes é tomada como uma indicação de que uma água não contém microrganismos patogénicos.

⁽¹⁾ Em geral, os resultados dos testes indicadores da presença de microrganismos patogénicos são expressos em (nº de microrganismos/100 ml).

QUADRO 3 - PRINCIPAIS MICRORGANISMOS PATOGENICOS QUE PODEM ESTAR PRESENTES NA ÁGUA

| Organismos | Doenças |
|---|-------------------------------|
| Bactérias | |
| <i>Vibrio cholerae</i> | Cólera |
| <i>Shigella spp.</i> | Desintéria bacilar |
| <i>Salmonella typhi</i> | Febre tifóide |
| <i>Salmonella paratyphi</i> | Febre paratifóide |
| <i>Escherichia coli</i> (tipos enteropatógenicos) | Diarreia infantil |
| <i>Salmonella, Shigella e Proteus spp.</i> | Gastroenterites |
| <i>Leptospira spp.</i> | Leptospirose |
| <i>Pasteurella tularensis</i> | Tularémia (rara) |
| Vírus | |
| <i>Coxsachie e Echo</i> | Enterites |
| Adenovírus e reovírus | Faringites e rinofaringites |
| Vírus da hepatite | Hepatite |
| Parasitas | |
| <i>Ascaris spp.</i> | Ascariíase |
| <i>Schistosoma spp.</i> | Bilharziose ou schistosomíase |
| <i>Entamoeba histolytica</i> | Amibíase intestinal |

Como métodos na determinação dos indicadores da presença de microrganismos patogénicos têm sido usados o do número mais provável (NMP) e o da membrana filtrante, conforme imposto no respectivo Anexo do Decreto-Lei nº 236/98, de 1 de Agosto.



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E ARQUITECTURA
SECÇÃO DE HIDRÁULICA E DOS RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAIS
LICENCIATURA EM ENGENHARIA CIVIL

CICLOS DOS NUTRIENTES



1. INTRODUÇÃO

A regeneração de nutrientes (azoto, fósforo e enxofre) constitui uma das funções primordiais dos microrganismos na biosfera. Dada a sua importância, e apesar da complexidade dos fenómenos envolvidos, considera-se que no conjunto de conceitos teóricos ligados à qualidade da água, não pode deixar-se de abordar este assunto.

2. TRANSFORMAÇÃO DO AZOTO

O azoto é um elemento que se encontra presente nos sistemas biológicos em elevadas quantidades, estando incorporado numa vasta gama de matérias celulares, tais como proteínas e ácidos nucleicos. Assim, é de toda a importância conhecer os processos envolvidos na transformação do azoto, dado que eles controlam numa forma decisiva a actividade biológica. Na natureza existem cinco processos de transformação do azoto, a saber (Fig. 2):

- assimilação do azoto;
- mineralização do azoto;
- nitrificação;
- desnitrificação;
- fixação do azoto.

A biodegradação das células dos animais, das plantas e dos microrganismos e dos correspondentes dejectos orgânicos é acompanhada pela conversão, ou mineralização, do azoto orgânico para a sua forma inorgânica. Inversamente, durante o crescimento das plantas ou dos microrganismos, o azoto inorgânico é assimilado pela conversão em protoplasma orgânico.

As formas inorgânicas do azoto são convertidas através de uma série de processos bioquímicos. Assim, a nitrificação corresponde à conversão da amónia (NH_4^+) a nitratos (NO_3^-), a qual ocorre em condições francamente aeróbias. A desnitrificação corresponde à conversão dos nitratos a azoto gás (N_2), a qual se processa sob condições redutoras, mas não totalmente anaeróbias.

Por sua vez, o azoto gás é novamente incorporado no sistema através de bactérias e algas capazes da sua fixação.

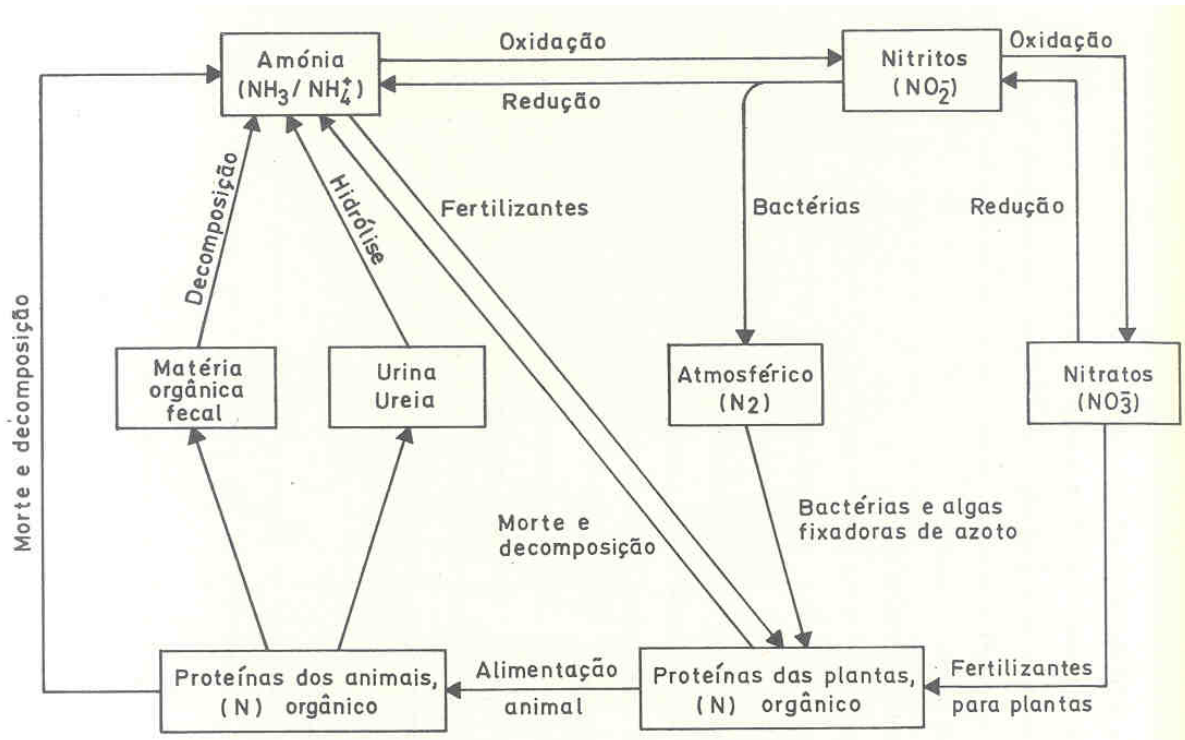


Fig. 2 – O ciclo do azoto

Assimilação

O crescimento microbológico requer a utilização de substratos com carbono, de tal forma que por cada 100 unidades de carbono incorporadas nas células são necessárias 5 a 10 unidades de azoto, aproximadamente, ou seja, a relação C : N nas células está, em geral, compreendida entre 5 e 10. Define-se assimilação como o processo de incorporação, pelos microrganismos, do azoto inorgânico sob forma de amónia ou nitratos.

Mineralização

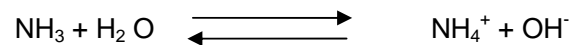
A mineralização do azoto corresponde à libertação das formas inorgânicas de azoto (NH_3 e NH_4^+) durante os processos microbológicos de degradação dos compostos orgânicos azotados (proteínas, matéria orgânica fecal, ureia, etc.). Tal como no processo de assimilação, a



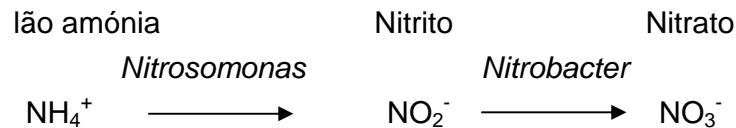
mineralização depende da concentração de carbono disponível no ecossistema.

Nitrificação

O azoto amoniacal em solução aquosa pode apresentar-se sob a forma do ião amónia (NH_4^+) ou amoníaco (NH_3), de acordo com a seguinte reacção de equilíbrio:



O ião amónia libertado durante a mineralização da matéria orgânica é transformado, por oxidação, em nitratos pelas bactérias nitrificadoras, num processo designado por nitrificação, e que compreende as duas seguintes fases:

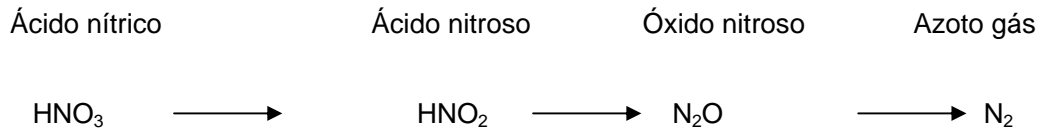


A acção das bactérias nitrificadoras é dependente de um conjunto de condições ambientes, das quais se destacam:

- requerem valores elevados de oxigénio dissolvido;
- as bactérias *Nitrobacter* são inibidas para valores de pH acima de 9,5 na presença de NH_4^+ , enquanto que as bactérias *Nitrosomonas* mantêm a sua actividade sob condições alcalinas, mas são inibidas para valores de pH abaixo de 6,0;
- a temperatura óptima para a nitrificação é 30 °C, não se verificando qualquer actividade abaixo dos 5 °C e acima dos 40 °C.

Desnitrificação

Na falta de oxigénio, certas bactérias designadas por desnitrificadoras dão origem a um processo designado por desnitrificação, o qual compreende a redução dos nitratos a azoto gás e óxido nitroso. À medida que as condições ambientes se tornam mais deficientes de oxigénio, maior é a percentagem de azoto gás que se forma:



As bactérias desnitrificadoras mais comuns são: *bacillus denitrificans*, *pseudomonas stutzeri* e *achromobacter*. Os factores que afectam o processo de desnitrificação incluem a quantidade de matéria orgânica disponível, a concentração de oxigénio, a temperatura e o pH.

Fixação do azoto

A fixação do azoto gás do ar e sua conversão em proteínas celulares é obtida pelas bactérias fixadoras de azoto. Existem três grupos de microrganismos deste tipo:

- bactérias não-simbióticas (*Azotobacter* e *Clostridium*);
- algas verdes-azuis (*Anabaena* e *Nostoc*);
- bactérias (*Rhizobium*);

3. CICLO DO FÓSFORO

Tal como o azoto, o fósforo é um elemento de grande importância em toda a actividade de crescimento de algas e outros organismos biológicos. Dado o efeito nocivo do crescimento anormal de algas em massas de água, presentemente tem sido dada grande importância no controle dos compostos de fósforo rejeitados pelos efluentes domésticos e industriais, e provenientes do escoamento superficial. Os compostos de fósforo são utilizados em grandes quantidades nos fertilizantes agrícolas, nos detergentes e nos processos industriais.

O ciclo do fósforo está confinado às transformações bioquímicas que mineralizam o fósforo orgânico, solubilizam as formas insolúveis e assimilam nas células os fosfatos inorgânicos. As formas mais vulgares da ocorrência do fósforo nas águas naturais incluem os ortofosfatos (PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- e H_3PO_4), os polifosfatos (forma molecular não-hidratada) e os fosfatos orgânicos.

4. CICLO DO ENXOFRE

O enxofre encontra-se em abundância nos minerais, nos sedimentos, no solo e na água. Contrariamente ao que se passa com o azoto e o fósforo, o enxofre raramente é um elemento limitativo de crescimento, apesar da sua presença em todos os organismos vivos.

As transformações do enxofre podem ser divididas nos quatro grupos seguintes (Fig. 3):

- mineralização do enxofre orgânico;
- assimilação dos compostos inorgânicos do enxofre;
- oxidação dos compostos inorgânicos reduzidos;
- Redução dos compostos inorgânicos oxidados.

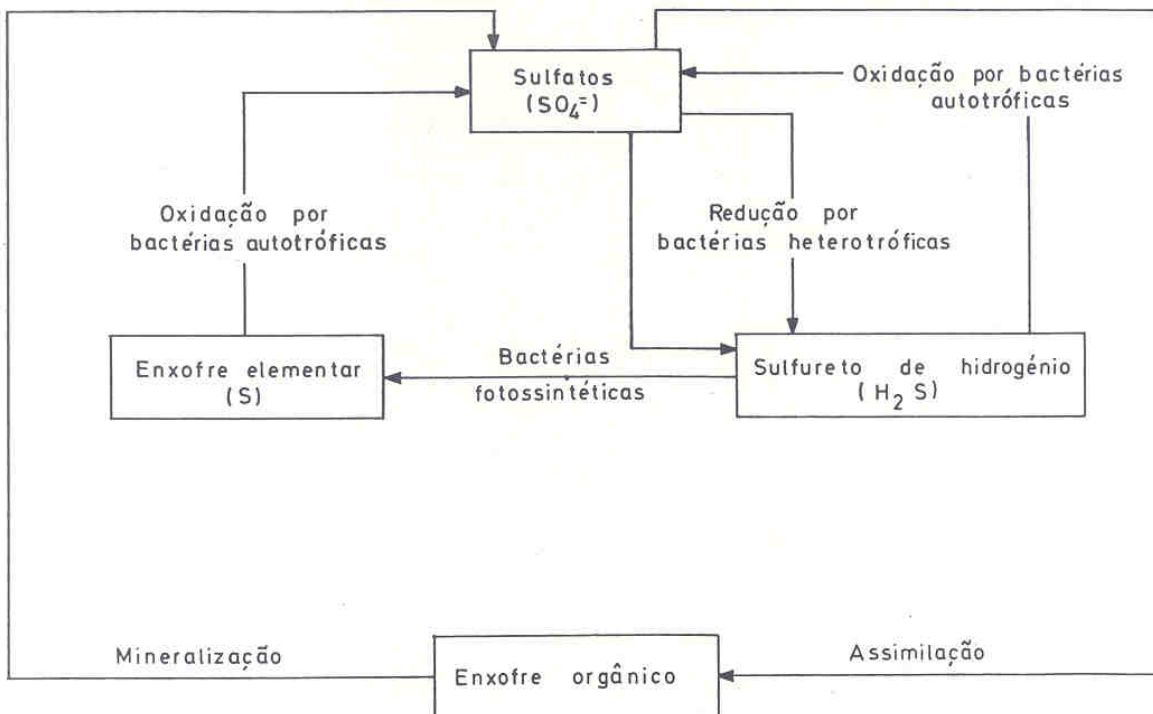


Fig. 3 – O ciclo do enxofre



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E ARQUITECTURA
SECÇÃO DE HIDRÁULICA E DOS RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAIS
LICENCIATURA EM ENGENHARIA CIVIL

As formas orgânicas do enxofre são mineralizadas pela biodegradação de células mortas ou de dejectos orgânicos contendo compostos de enxofre. Os compostos inorgânicos de enxofre mais abundantes são o sulfureto de hidrogénio (gás sulfídrico - H_2S), o enxofre elementar e os sulfatos (SO_4^{2-}).

Os sulfatos têm uma importância grande na engenharia sanitária dado que são indirectamente responsáveis por dois problemas na drenagem e no tratamento de águas residuais: os maus cheiros e a corrosão das tubagens. Estes problemas resultam da redução, em condições anaeróbias, dos sulfatos a sulfureto de hidrogénio (gás sulfídrico com cheiro a ovos podres), de acordo com as seguintes reacções:





DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E ARQUITECTURA
SECÇÃO DE HIDRÁULICA E DOS RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAIS
LICENCIATURA EM ENGENHARIA CIVIL

DECOMPOSIÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA



1. ORIGEM E NATUREZA DA MATÉRIA ORGÂNICA E O CICLO DO CARBONO

Muitos dos problemas associados com o controle da qualidade da água são devidos à presença de matéria orgânica de fontes naturais ou sob a forma de descargas de águas residuais. Na natureza, existe um fluxo contínuo de carbono para o solo e para as massas de água, sendo a biodegradação deste material fundamental para a vida na terra.

A biodegradação dos compostos de carbono é essencial devido aos seguintes aspectos:

- todos os organismos vivos necessitam do carbono como elemento fundamental, de tal forma que se não houvesse uma degradação dos organismos mortos e da matéria orgânica a natureza seria *inundada* apenas com os resíduos dos animais, das plantas e dos microrganismos;
- por outro lado, a biodegradação liberta nutrientes essenciais para o crescimento de outros organismos, de tal forma que esta mineralização da matéria orgânica permite manter *um armazém* daqueles nutrientes para a actividade biológica.

Os compostos orgânicos disponíveis para a biodegradação pelos microrganismos são provenientes dos organismos mortos (animais e plantas), das excreções orgânicas (animais e seres humanos) e dos compostos de carbono não-biogénico.

Duma maneira geral, todos os organismos, dos animais aos protistas, são biodegradados e os seus nutrientes reincorporados, como componentes abióticos, no solo e na água. Todo este processo ocorre na natureza naturalmente e sem produção de desequilíbrios biológicos significativos. No entanto, a maior fonte de perturbação é provocada pelas excreções orgânicas dos animais e dos seres humanos quando, directa ou indirectamente, atingem as massas de água naturais. Os compostos de carbono não-biogénico incluem os hidrocarbonetos, os óleos, os pesticidas e as águas residuais industriais de vários tipos, muitos dos quais de difícil biodegradação.

A fonte primária de carbono para os organismos vivos é o anidrido carbónico do ar, o qual é fixado nos tecidos biológicos pelos foto-autotróficos produtores primários, ou seja, as plantas e as algas. Embora os quimio-autotróficos também sejam capazes de fixar o anidrido carbónico do ar, a sua importância relativamente a este aspecto é, sem dúvida, muito menor do que para os foto-auto-

tróficos.

A cadeia alimentar constitui, por assim dizer, o veículo do carbono que é reciclado através dos organismos vivos (Fig. 4). Os organismos hetero-tróficos consomem os autotróficos utilizando o carbono destes como substrato para o crescimento e como fonte de energia. Por outro lado, os microrganismos heterotróficos obtêm o seu substrato para o crescimento e como fonte de energia a partir da degradação dos compostos carbonados das plantas, das algas, dos animais e de outros microrganismos. Além disso, os microrganismos utilizam as excreções orgânicas como fonte de carbono.

Em todo este processo, a matéria orgânica abiótica proveniente da degradação dos organismos mortos e dos produtos de excreção tem um papel preponderante. Esta matéria orgânica é a fonte de nutrientes para um grande número de microrganismos heterotróficos. Uma parte significativa do anidrido carbónico utilizado nos processos biológicos é devolvida à atmosfera, através da respiração das plantas na escuridão, dos animais, incluindo o homem, e dos microrganismos.

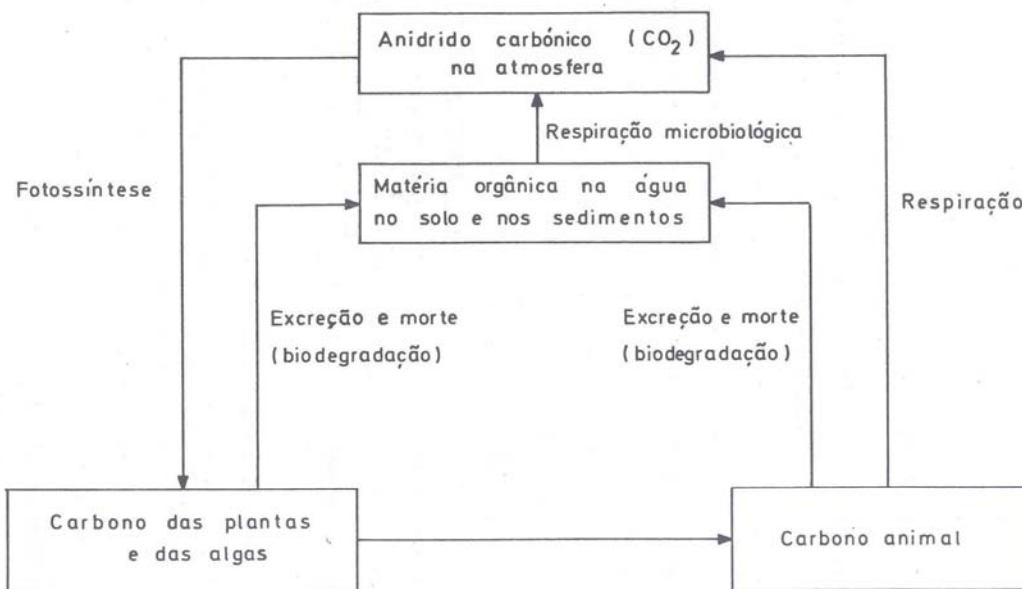


Fig. 4 – O ciclo do carbono



Quanto à natureza da matéria orgânica, existem os três tipos principais seguintes:

- carboidratos que contêm carbono, hidrogénio e oxigénio, cujos exemplos típicos são os açúcares, como por exemplo a glucose ($C_6 H_{12} O_6$), o amido e a celulose;
- compostos azotados que contêm carbono, hidrogénio, oxigénio, azoto e, nalguns casos, enxofre. Os principais compostos deste tipo são as proteínas, os amino-ácidos e a ureia;
- lípidos ou gorduras que contêm carbono, hidrogénio e algum oxigénio, os quais são praticamente insolúveis na água, mas solúveis em solventes orgânicos.

2. DECOMPOSIÇÃO AERÓBIA E ANAERÓBIA

A degradação da matéria orgânica abiótica é levada a efeito por bactérias de duas formas distintas: aeróbia e anaeróbia. Na presença de oxigénio, é a decomposição aeróbia que se verifica, em que parte da matéria orgânica é sintetizada sob a forma de novos microrganismos e a restante é convertida em produtos finais estáveis. Na falta de oxigénio, a matéria orgânica é degradada por processos anaeróbios, os quais dão origem a novas células e produtos finais instáveis. Na Fig. 5, apresenta-se um esquema simplificado destes dois tipos de degradação da matéria orgânica.

Decomposição aeróbia e carência bioquímica de oxigénio

A decomposição da matéria orgânica pela microflora dos ecossistemas aquáticos é acompanhada por uma diminuição da concentração de oxigénio dissolvido na água. Se a taxa de utilização do oxigénio for maior do que a correspondente ao rearejamento superficial, podem ocorrer condições anaeóbias.

A taxa potencial de degradação da matéria orgânica e de utilização do oxigénio pode ser avaliada pela medição da carência bioquímica de oxigénio (CBO) da água. O CBO é determinado pela colocação de uma dada amostra de água numa garrafa selada, a qual é incubada a 20 °C e durante 5 dias. A quantidade inicial de matéria orgânica disponível para decomposição é medida, no fim do período de incubação, através da quantidade de oxigénio que foi consumida. Este é o teste utilizado na maior parte dos casos, para determinar o consumo de oxigénio pelos microrganismos, nas massas de água.



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E ARQUITECTURA
SECÇÃO DE HIDRÁULICA E DOS RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAIS
LICENCIATURA EM ENGENHARIA CIVIL

A decomposição começa pela acção das bactérias presentes na oxidação dos carboidratos (que são os compostos que mais facilmente se prestam a fornecer energia) e no desmembramento das proteínas e de outras moléculas grandes, com libertação de anidrido carbónico e de amónia. Esta primeira fase designa-se por estádio de carbono e a sua duração depende da existência de oxigénio e de matéria orgânica.

Quando a matéria orgânica começa a desaparecer, as bactérias nitrificadoras, que desde o início do processo se encontravam presentes, mas que eram ofuscadas pelas outras, menos específicas, que participavam na oxidação dos compostos de carbono, entram em acção, na sua tarefa de oxidar a amónia em nitritos (primeiro passo) e os nitritos em nitratos (segundo passo), também com consumo de oxigénio. Esta segunda fase designa-se por estádio azotado, tendo uma duração bastante superior, em geral, à da primeira fase. A carência bioquímica de oxigénio tende para um limite designado por carência última de oxigénio, abreviadamente CUO.

Cada um dos estádios da curva de CBO, como adiante se apresenta na Figura 6, pode ser considerado como seguindo uma reacção de 1ª ordem, isto é, a velocidade de consumo do oxigénio é proporcional à quantidade de matéria orgânica por oxidar. Matematicamente, esta lei pode ser traduzida pela seguinte expressão:

$$\frac{dL_t}{dt} = -k_1 L$$

- L_t - quantidade de oxigénio que falta consumir, num determinado instante t , para se atingir a carência última L
- t - tempo, contado a partir dum determinado instante
- k_1 - constante de proporcionalidade ou constante de velocidade da reacção

Da integração da expressão anterior, resulta a seguinte equação que traduz o valor de L_t :

$$L_t = L e^{-k_1 t}$$

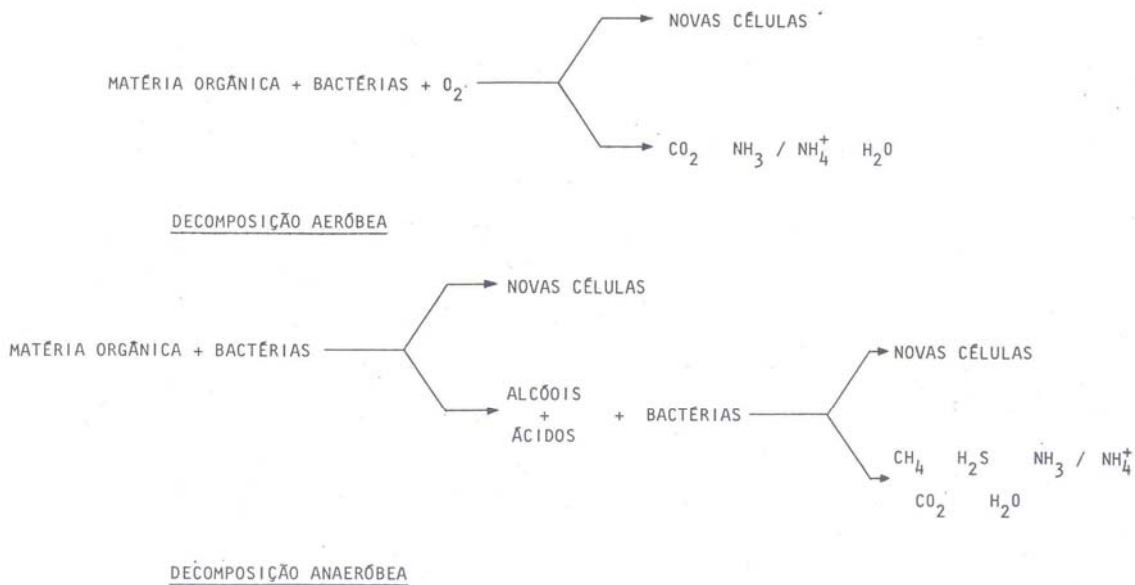


Fig. 5 – Formas de decomposição da matéria orgânica

Dado que o importante é a quantidade de oxigénio consumida, ao fim do tempo t , e não a carência de oxigénio remanescente, então a carência bioquímica ao fim do tempo t é dada pela expressão:

$$CBO_t = L - L_t = L(1 - e^{-k_1 t})$$

O valor da constante k_1 de velocidade da reacção, a 20 °C, é cerca de 0,23 dia⁻¹, para o estádio de carbono e para as águas residuais domésticas. O valor desta constante depende, para além de outros factores, da temperatura.

Decomposição anaeróbia

A decomposição e estabilização da matéria orgânica por digestão anaeróbia é um mecanismo que se processa em duas fases interligadas: formação de ácidos e fermentação metânica.

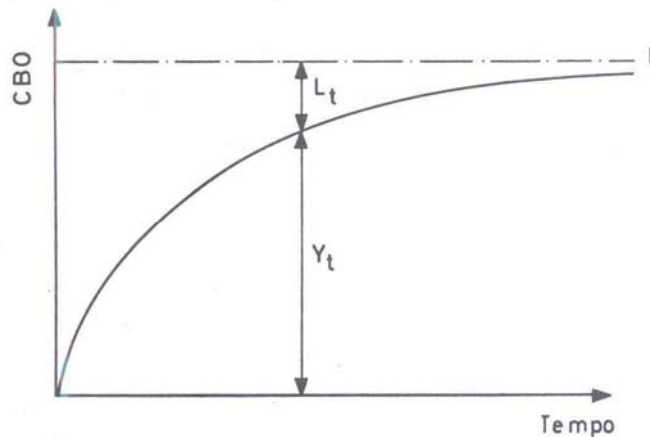


Fig. 6 - Curva de carência bioquímica de oxigénio

Na primeira fase, um grupo de microrganismos transforma, por hidrólise e fermentação, compostos orgânicos complexos, tais como as proteínas, os carboidratos e as gorduras, em ácidos orgânicos voláteis, de entre os quais os mais comuns são o ácido acético ($\text{CH}_3 \text{COOH}$) e o propiónico ($\text{CH}_3 \text{CH}_2 \text{COOH}$). Este grupo é constituído por bactérias anaeróbias e facultativas designadas por formadoras de ácidos. Durante esta fase, a redução da carência bioquímica de oxigénio ou de carbono orgânico total é muito reduzida ou praticamente nula.

Na segunda fase, um outro grupo de bactérias estritamente anaeróbias converte os ácidos orgânicos voláteis em gás metano (CH_4) e anidrido carbónico (CO_2). Estas bactérias são designadas por formadoras de metano ou metanogénicas. O gás metano é praticamente insolúvel, pelo que se escapa para a atmosfera.