

# Aspectos quantitativos da bacteriologia sanitária

Prof. José M. de Azevedo Netto

## 1 INTRODUÇÃO

As bactérias são organismos microscópicos, unicelulares e simples, que pertencem à divisão inferior do reino vegetal, compreendendo mais de 100 classes. Elas medem desde 0,2 até 60 milésimos de milímetro.

Estão presentes em grande número e em todas as partes, tendo sido encontradas a 9 mil m abaixo do nível oceânico e em locais com temperaturas acima de 80 C.

As bactérias exercem importante papel nas transformações orgânicas, sendo, por isso, indispensáveis à manutenção da vida em nosso planeta.

Na sua maioria as bactérias não são nocivas para o homem, existindo, ao contrário, muitas que são aproveitadas para seu benefício, na fabricação de bebidas, solventes e queijos, no tratamento de resíduos orgânicos etc.

São seres de alta eficiência e de grande resistência que se alimentam e crescem continuamente e que se reproduzem, principalmente, por simples divisão (fissiparidade).

Em condições favoráveis (temperatura, pH, presença de água, concentração de alimentos e ausência de substâncias nocivas) elas se multiplicam a cada 20 minutos.

Na Engenharia Sanitária as bactérias são os agentes que promovem a autodepuração dos cursos d'água, a depuração dos esgotos pelos processos biológicos e a decomposição da matéria orgânica nos digestores. Em contraposição, a eliminação de certas bactérias constitui o objetivo da desinfecção.

Esses processos sanitários e também os industriais, que envolvem aspectos quantitativos, incluindo avaliações, medições e resultados de produtividade, abrangem vários assuntos de grande importância para os engenheiros:

- Crescimento orgânico;
- Divisão celular e reprodução irrestrita;
- Multiplicação restrita;
- Decaimento da população de bactérias;

- Fermentações (restrita e irrestrita);
- Desinfecção. Taxa de mortalidade;
- Esterilização;
- Avaliações probabilísticas.

Neste trabalho serão abordados os assuntos de maior interesse para a Engenharia Sanitária.

## 2 DIVISÃO CELULAR, MULTIPLICAÇÃO IRRESTRITA

Em ambiente favorável uma bactéria cresce e se divide em duas células. Estas, por sua vez, se desenvolvem e acabam se dividindo em outras células. Mantendo-se esse desenvolvimento em progressão geométrica, com razão 2, tem-se:

$$2^0 \dots 2^1 \dots 2^2 \dots 2^3 \dots 2^4 \dots 2^n$$

(1)    (2)    (4)    (8)    (16)    (2<sup>n</sup>)

Se fizermos:

- a = Número inicial de bactérias
- b = Número final de bactérias, após o tempo t
- n = Número de gerações
- t = Tempo total decorrido
- g = Tempo de geração, isto é, o intervalo de tempo médio necessário à duplicação do número de bactérias.

A multiplicação irrestrita levaria a:

$$\text{Número de gerações: } 0 \dots 1 \dots 2 \dots 3 \dots 4 \dots \dots n$$

$$\begin{aligned} \text{n.º de bactérias: } & a^0 \dots a^1 \dots a^2 \\ (= a) & \\ a^{2^3} \dots a^{2^4} \dots a^{2^n} & = b \end{aligned}$$

$$b = a^{2^n}$$

$$\log b = \log a + n \log 2$$

$$n = \frac{\log b - \log a}{\log 2} \dots \dots \dots (1)$$

Como, para ocorrer cada geração são necessários g min n gerações levariam gn minutos, isto no tempo total de observação t:

$$gn = t$$

$$\text{ou } g = \frac{t}{n}$$

Substituindo-se o valor de n em (1):

$$g = \frac{t \log 2}{\log b - \log a}$$

O que mais interessa, entretanto, é o número final de bactérias e a taxa de crescimento:

$$b = a \cdot 2^n = a 2^{t/g}$$

$$\frac{db}{dt} = k b \text{ (onde k é a taxa de$$

crescimento)

$$\frac{db}{b} = k dt$$

$$e \int \frac{b}{db} = \int 1_n b = k^t + C$$

$$\text{ou ainda, } 1_n b - C = k^t \dots \dots \dots (2)$$

Para t = 0 e b = a

$$1_n a = 0 + C \text{ e } C = 1_n a \text{ e}$$

Aplicando-se em (2):

$$1_n b - 1_n a = k^t$$

$$\therefore k = \frac{1}{t} \left( 1_n b - 1_n a \right)$$

$$k = \frac{\log_{10} b - \log_{10} a}{t \log e}$$

$$k = \frac{\log_{10} b - \log_{10} a}{t \times 0,434} \dots \dots \dots (3)$$

As condições de crescimento exponencial ocorrem durante um período limitado, pois a partir de certo tempo a redução progressiva de alimento, a presença de resíduos orgânicos do próprio processo e a existência de outros organismos predadores restringem a multiplicação bacteriana. O tempo de geração apenas permanece constante durante a fase inicial, para a qual a equação acima dá o valor de  $k$ .

A título de curiosidade, se considerada a multiplicação irrestrita, cada 20 min após dois dias (48 h) seria produzido um número astronômico de bactérias, totalizando  $20 \times 10^{24}$  t, ou seja, praticamente quatro mil vezes a massa da Terra.

### 3 CRESCIMENTO RESTRITO

O exame de muitos fenômenos biológicos relativos ao crescimento de populações conduz a uma curva representativa, denominada "Curva de Crescimento", onde são distinguidas as seguintes fases (fig. 1):

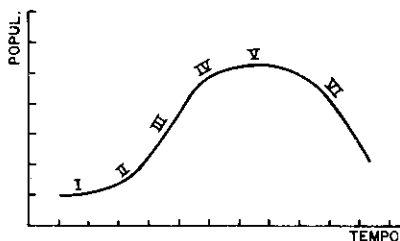


Figura 1 — Curva de crescimento

- I — Fase inicial lenta
- II — Fase de crescimento exponencial (geométrico)
- III — Fase de crescimento aritmético
- IV — Fase de crescimento retardado (de primeira ordem)
- V — Fase estacionária (endogenia estacionária)
- VI — Fase de decaimento.

O crescimento demográfico de cidades grandes ou países geralmente segue uma curva desse tipo nas suas três fases iniciais. O estudo de uma população de drosófilas ou moscas domésticas, em um ambiente fechado, conduz a uma curva idêntica em todas as fases.

### 4 TAXA DE MORTALIDADE

Estudando-se a mortalidade de animais sob os efeitos de um ambiente hostil como, por exemplo, o caso de insetos sujeitos à ação de inseticidas ou de soldados em atividade de guer-

ra sob a ação de gases tóxicos, encontra-se uma curva de mortalidade semelhante ao ramo descendente da Fig. 1.

Em circunstâncias semelhantes como, por exemplo, sob a ação violenta de desinfetantes, as bactérias mostram um comportamento diferenciado (Fig. 2), com uma linha quase reta, representando a mortalidade (A população presente ou sobrevivente representada em escala logarítmica). A situação é inversa em relação à do crescimento irrestrito.

A equação (3) ficará:

$$k = \frac{\log_{10} a - \log_{10} b}{0,434 \times t} \dots (4)$$

que permite calcular a taxa de mortalidade  $k$ . ( $k$  tem um valor particular para cada agente de destruição e para cada condição do meio).

Essa equação é importantíssima para o sanitarista, aplicando-se ao ensaio a avaliação de concentrações e a comparação técnica entre desinfetantes diversos.

Dessa mesma expressão pode-se obter para o tempo de destruição:

$$t = \frac{\log_{10} a - \log_{10} b}{k \times 0,434} \dots (5)$$

Deve-se ter sempre em mente que os agentes desinfetantes não têm ação instantânea, razão pela qual deve ser previsto um tempo de contato nas instalações.

Nas estações de tratamento de água, onde for adotada a cloração da água, deve-se estabelecer um tempo mínimo de contato. Esse tempo dependerá do tipo de desinfetante, do número inicial de bactérias, das espécies a serem destruídas, da temperatura, do pH, da agitação etc.

### 5 EFEITO DA TEMPERATURA NA DESINFECÇÃO

A temperatura afeta a desinfecção de maneira semelhante à que se passa com as reações químicas: a taxa de destruição cresce com a elevação da temperatura; muitas vezes cerca de duas a três vezes para cada elevação de 10°C. Exprime-se essa variação através do "coeficiente de temperatura" ou  $Q_{10}$ , definido por:

$$Q_{10} = \frac{\text{taxa, a } (t+10) \text{ graus}}{\text{taxa, a } t \text{ graus}} = \frac{k_2}{k_1} \quad (6)$$

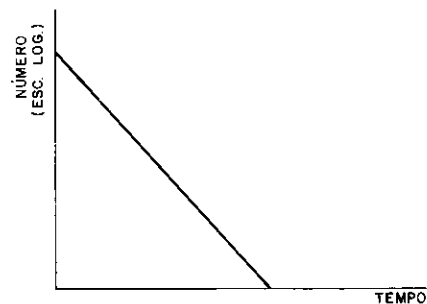


Figura 2 — Desinfecção de bactérias

( $Q_{10}$  é, portanto, um coeficiente que corresponde a uma variação de 10°C na temperatura).

Se a diferença de temperatura entre dois testes não for de 10°, mas sim de delta graus ( $\Delta t$ ), obtém-se o coeficiente  $Q_{10}$  pela seguinte expressão:

$$Q_{10} = \sqrt[10]{\left(\frac{k_1 + \Delta t}{k_1}\right)^{10}} \dots (7)$$

### 6 EFEITO DA VARIACÃO DE CONCENTRAÇÃO DO DESINFETANTE

A influência da concentração ( $C$ ) segue, aproximadamente, a relação empírica:

$$C^n t = \text{const.}$$

onde  $n$  é o coeficiente de diluição.

A influência da concentração de um agente químico (desinfetante), sobre a taxa de mortalidade passa a ser:

$$k = \frac{\log_{10} a - \log_{10} b}{0,434 \cdot t \cdot C^n}$$

Partindo-se de experiências feitas com duas concentrações diferentes,  $C_1$  e  $C_2$ , chega-se a taxas de mortalidade também diferentes, relacionadas matematicamente por:

$$\frac{k_1}{k_2} = \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^n$$

sendo:

$$n = \frac{\log_{10} k_1 - \log_{10} k_2}{\log_{10} C_1 - \log_{10} C_2}$$

### 7 EFEITO DA VARIACÃO DO pH

O efeito pH na desinfecção pode ser apreciado tanto para o caso da

aplicação de cloro livre como no caso de cloraminas. Consta-se que quanto mais alto o pH maiores serão as concentrações necessárias e maiores os tempos necessários para a destruição (Fig. 3).

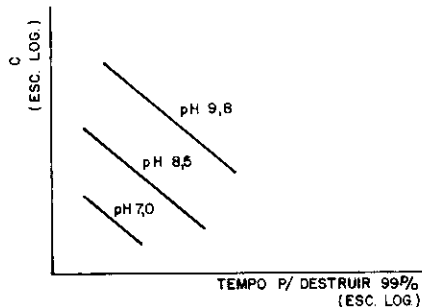


Figura 3 — Efeito do pH

Essa é a razão pela qual, nas estações de tratamento de água, prefere-se fazer a cloração antes da elevação do pH (correção do pH).

## 8 O DECAIMENTO NATURAL

Para o seu pleno desenvolvimento as bactérias necessitam de condições favoráveis à sua vida:

- a — Presença de substâncias alimentícias e em certos casos oxigênio livre, gás carbônico, metano, carbonatos etc.
- b — Temperatura dependendo do tipo de bactéria:

Bactérias psicofílicas ..... 10 a 20°  
 Bactérias mesofílicas ..... 20 a 40°  
 Bactérias termofílicas ..... 40 a 65°

As bactérias patogênicas para o homem florescem em temperaturas em torno de 37°C.

As bactérias são menos sensíveis ao frio: em temperaturas muito baixas elas hibernam e podem sobreviver por muito tempo.

- c — pH

De modo geral o pH ótimo está entre 6,5 e 7,5, porém bactérias podem resistir a valores extremos de pH: 4,0 a 9,5.

Em ambiente desfavorável o número de bactérias apresenta uma redução progressiva.

No mar, por exemplo, o meio salino, a ação do sol e dos bacteriófagos aceleram o decaimento bacteriológico.

Admitindo-se que o decaimento natural siga a lei de Chick e que N seja o número de organismos:

$$\frac{dN}{dt} = -kN$$

$$N = N_0 e^{-kt}$$

$N_0$  = número inicial de organismos  
 $t$  = tempo decorrido  
 $k$  = taxa de decaimento.

Para efeitos práticos costuma-se considerar o tempo necessário para ocorrer uma redução de 90% na contagem. O tempo correspondente a essa redução denomina-se  $t_{90}$ :

$$t_{90} = \frac{1}{k}$$

## 9 O GRUPO COLIFORME

Os coliformes constituem um grupo de organismos com características comuns que se apresentam em quantidades extremamente elevadas nas fezes e que também se apresentam no solo, nos vegetais em decomposição e em outros meios.

Uma boa parte das fezes humanas é constituída por 100 a 400 trilhões de coliformes defecados diariamente por pessoa (esse número fabuloso corresponde apenas a um milésimo do número total de bactérias presentes nas fezes).

O nome para esse grupo provém da bactéria fecal denominada Coli, isolada em 1884 por Escherich (que imaginava que ela fosse a causadora da cólera). Atualmente essa bactéria se denomina Escherichia Coli.

Os bacilos Coli constituindo cerca de 90% dos coliformes presentes na matéria fecal servem convenientemente para serem indicadores da contaminação. Acresce mencionar que a sua identificação e a sua contagem são relativamente fáceis, podendo ser feitas por qualquer operador.

A aceitação desses organismos como indicadores decorreu de um expediente prático, de grande utilidade.

O E. Coli não causa enfermidades de transmissão hídrica; é uma bactéria comum, que apenas apresenta problema quando é eventualmente introduzida em um órgão que não constitui o seu meio próprio.

Como existe uma correlação de presença e de redução, entre coliformes e bactérias patogênicas e vírus intestinais tornou-se vantajosa a adoção dos coliformes como organismos indicadores da contaminação.

## 10 A CONTAGEM DE COLIFORMES

A aplicação do método de exame de coliformes foi iniciada em Nova Iorque em 1892.

A princípio os resultados eram apresentados com a denominação de Índi-

ce Coli. (O termo Coliforme somente passou a ser adotado a partir de 1942.)

No início da década de 30 começou a se tornar evidente a imprecisão do Índice Coli, tal como vinha sendo avaliado e utilizado.

J. K. Hoskins foi um dos especialistas, que tendo constatado os inconvenientes do velho índice, passou a inventar o uso de um sistema mais perfeito, a partir de 1933.

O aperfeiçoamento veio com a aplicação do moderno cálculo de probabilidades ao problema de avaliação dos organismos presentes nas águas. Surgiu então o Número Mais Provável de coliformes presentes (NMP) ou MPN, (em inglês), que foi padronizado em 1936.

A teoria probabilística conduz à seguinte expressão:

$$y = \frac{1}{a} \left[ \frac{e^{-N\lambda} \lambda^p}{(1-e^{-\lambda})^p} \frac{e^{-N\lambda} \lambda^q}{(1-e^{-\lambda})^q} \right] \left[ \frac{e^{-N\lambda} \lambda^r}{(1-e^{-\lambda})^r} \frac{e^{-N\lambda} \lambda^s}{(1-e^{-\lambda})^s} \right]$$

na qual:  $\left[ \frac{e^{-N\lambda} \lambda^t}{(1-e^{-\lambda})^t} \frac{e^{-N\lambda} \lambda^v}{(1-e^{-\lambda})^v} \right] \left[ \dots \dots \right]$

$N_1, N_2, N_3$  são os tamanhos das amostras examinadas, em  $cm^3$  ou ml.

$p, r, t$  são os números de porções dos tamanhos respectivos que tenham dado resultados positivos.

$q, s, u$  são os números de porções dos tamanhos respectivos que tenham dado resultados negativos.

$\lambda$  = concentração de E. Coli/ $cm^3$  ou ml.

$y$  — probabilidade de máxima ocorrência.

$a$  — constante (às vezes desprezada).

Na prática são utilizadas tabelas com valores já calculados.

Uma fórmula prática, aproximada, para o cálculo do NMP é a seguinte:

$$NMP/ml = \frac{n^\circ \text{ de tubos positivos}}{\sqrt{n^\circ \text{ de ml nos tubos negat.} \times n^\circ \text{ de ml em todos os tubos}}}$$

## 11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN Public Health Association, **Standard Methods for the examination of Water and Wastewater**, 12.ª ed., New York (1965).
- AZEVEDO Netto, J.M., **Tratamento de Águas de Abastecimento**, Editora Universidade de São Paulo, São Paulo (1966).
- BABITT, H.E. e J.J. Doland, **Water Supply Engineering**, Mc Graw-Hill, New York (1945).
- CAMP, Thomas R., **Water and its Impurities**, Reinhold Book Corp., New York (1968).
- FAIR, G. M., J. C. Gever e D. A. Okun, **Water Purification and Wastewater Treatment and Disposal**, John Wiley, New York (1968).