

16 > Reatores de biofilme

M.O. Pereira¹, R. Oliveira¹

¹ IBB – Instituto de Biotecnologia e Bioengenharia, Centro de Engenharia Biológica, Universidade do Minho, Campus de Gualtar, 4710-057 Braga, Portugal

* Autor para correspondência: mopereira@deb.uminho.pt

16.1 > Introdução

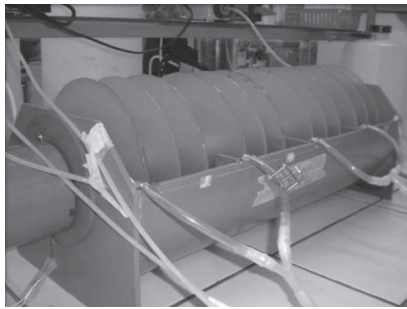
Um reator de biofilme é um reator biológico em que os microrganismos responsáveis pela transformação de um dado substrato se encontram imobilizados sobre um suporte, formando um biofilme, ou seja, estão embebidos numa matriz polimérica extracelular segregada pelos próprios. Estes reatores podem ser usados para a obtenção de diferentes tipos de produtos (por exemplo, ácido cítrico, etanol, ácido láctico, ácido fumárico, vinagre, etc.), mas a sua aplicação mais vasta é no tratamento de águas residuais e efluentes líquidos. Os sistemas de discos biológicos rotativos (RBC, do inglês *Rotating Biological Contactor*) e os leitos percoladores são exemplos clássicos de reatores de biofilme utilizados no tratamento de águas residuais e de efluentes (Figura 16.1). De facto, a elevada concentração de biomassa que caracteriza os reatores de biofilme facilita a rápida transformação dos contaminantes, permitindo tratar efluentes muito

concentrados ou elevados caudais, requerendo fisicamente pouco espaço.

Para além dos tradicionais reatores de biofilme, em que a biomassa está aderida a suportes sólidos, outros reatores há em que a biomassa se auto-suporta, agregando-se em grânulos esféricos compactos que são mantidos no reator devido à diferença de densidade. Estes biorreatores apresentam vantagens semelhantes às apresentadas pelos reatores de biomassa fixa em superfícies sólidas.

A geração mais recente de reatores de biofilme engloba os reatores que utilizam partículas sólidas inorgânicas em suspensão para a fixação da biomassa e não superfícies sólidas fixas. Com este tipo de reatores obtém-se, para além das vantagens já enunciadas para reatores de biofilme, um significativo aumento da área superficial de biofilme, bem como um controlo intrínseco da espessura do biofilme já que o excesso de biomassa é removido por abrasão, em consequência do contacto entre as partículas, e

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43



RBC - Discos biológicos rotativos
(do inglês *Rotating Biological Contactor*)



Filtro
anaeróbico

Figura 16.1 > Exemplos de protótipos laboratoriais de reatores de biofilme para tratamento de águas residuais.

pela intensidade de turbulência, principalmente nos sistemas trifásicos.

A Tabela 16.1 apresenta alguns dos reatores de biofilme de aplicação mais frequente em processos biotecnológicos, nomeadamente no tratamento de efluentes.

16.2 > Caracterização dos reatores de biofilme

A caracterização dos reatores de biofilme, em termos de padrão hidrodinâmico, do seu modo de funcionamento e, também, para efeitos de modelização, segue os princípios da engenharia de reatores químicos, tendo por base os três ti-

pos ideais de reatores: o reator contínuo agitado, que em linguagem de engenharia é conhecido por CSTR (do inglês *Continuous Stirred Tank Reactor*); o reator descontínuo (*batch reactor*) e o reator com fluxo pistão PFR (do inglês *Plug Flow Reactor*).

Os reatores que funcionam em descontínuo são constituídos por um volume reacional fechado que contém à partida todas as condições para se processar a reação e, conseqüentemente, a concentração do substrato e dos produtos varia ao longo do tempo de operação. No modelo ideal assume-se que é perfeitamente agitado, o que determina uma mistura perfeita, não havendo gradientes espaciais de concentração das espécies presentes.

Tabela 16.1 > Reatores de biofilme usados em processos biotecnológicos.

Reatores com biomassa não fixada a suportes sólidos	Reatores com biomassa aderida a suportes sólidos	
	Suporte fixo	Suporte móvel
Sistema de Lamas Ativadas	Leito percolador	Leito fluidizado
Digestor Anaeróbico	Filtro Submerso	Leito expandido
UASB (Reator de manto de lamas de fluxo ascendente)	Discos biológicos rotativos	Leito circulante
		<i>Air-Lift</i> (Reator de recirculação por arejamento)

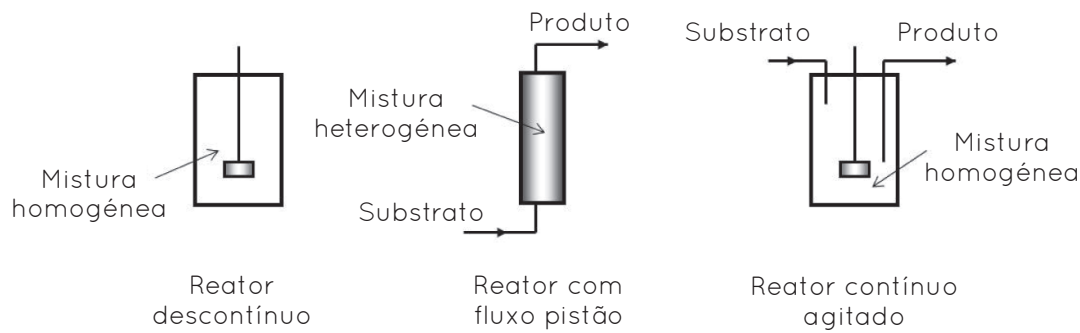


Figura 16.2 > Representação esquemática dos três tipos ideais de reatores.

Um reator CSTR ideal é formado por um volume reacional constante, mas aberto, que é continuamente alimentado com o substrato e dotado de uma corrente de saída, sendo perfeitamente agitado, o que origina uma homogeneidade espacial de concentração no interior do reator. Isto significa que a concentração de qualquer uma das espécies reacionais é igual em qualquer ponto do reator, o que facilita a amostragem e a análise do processo reacional, e que constitui uma das suas grandes vantagens.

O reator com fluxo pistão situa-se no extremo oposto da mistura perfeita, gerando-se no seu interior um gradiente de concentrações que é resultado do tipo de fluxo, o qual pode ser idealizado como sendo constituído por elementos (pacotes) de fluido que se movem ao longo do volume reacional sem se misturarem ou trocarem matéria. Como funciona em contínuo, as concentrações do substrato e do produto variam ao longo do reator, mas num dado ponto mantêm-se constantes ao longo do tempo.

Estes tipos ideais de reatores encontram-se esquematizados na Figura 16.2.

A nível industrial ou para estudos laboratoriais, os reatores de biofilme podem afastar-se do comportamento ideal, pois podem existir zonas estagnadas no interior do reator, ou haver curto-circuitos que determinam a passagem preferencial do fluido por certas zonas do reator ou até reciclos internos.

16.3 > Determinação do padrão hidrodinâmico

Até à data não existe nenhuma metodologia que permita determinar o padrão de distribuição de velocidades no interior do reator, mas o conhecimento do tempo que cada elemento de fluido passa dentro do reator permite determinar o perfil de distribuição dos tempos de residência (DTR), que é o conceito usado para a caracterização dos reatores reais.

A determinação da distribuição dos tempos de residência é feita usando a metodologia do estímulo-resposta. Ou seja, induz-se uma perturbação no reator, que é normalmente conseguida pela injeção de um traçador (substância inerte) na corrente de alimentação, à qual se segue uma resposta do sistema, que neste caso é a determinação da concentração de saída do traçador ao longo do tempo. Existem várias formas de introduzir a perturbação no sistema: por entrada aleatória, cíclica, em degrau e em impulso. As duas últimas formas são as que se usam com mais frequência porque é mais fácil acompanhar e caracterizar as respetivas respostas.

Após a injeção do traçador no tempo zero ($t=0$), segundo a forma definida para tal, inicia-se a medição da concentração do traçador na corrente de saída a partir do tempo $t=0$ e usando a curva "concentração, $C(t)$ função do tempo, t ",

1 calcula-se a função Distribuição de Tempos de
 2 Residência, $E(t)$, dada por:

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

35

36

37

38

39

40

41

42

43

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) dt}$$

O tempo de residência médio (TRM) é dado por:

$$TRM = \int_0^{\infty} t.E(t) dt$$

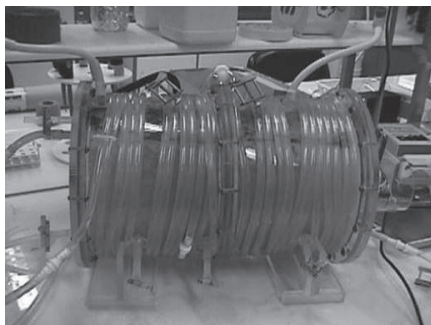
Com este valor pode calcular-se a percentagem de volume morto ($\% V_M$) no interior do reator:

$$\% V_M = \left(1 - \frac{TRM}{V}\right) \times 100$$

Para tornar a curva $E(t)$ independente do volume do reator é frequente usar um tempo adimensional (θ) que corresponde à razão entre o tempo real (t) e o tempo de residência (τ), ou seja:

$$\theta = \frac{t}{\tau}$$

Recorde-se que τ corresponde à razão entre o caudal volumétrico alimentado ao reator (Q) e o volume do reator (V), assim $\tau = Q/V$.

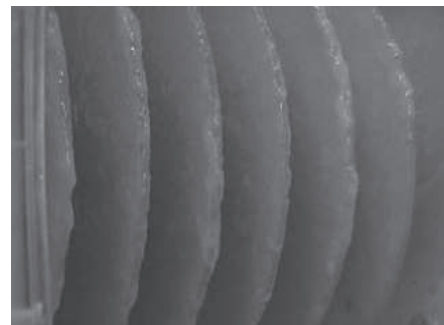


Reator de discos biológicos

16.3.1 > Modelos de Fluxo não-Ideal

Quando o fluxo no reator não é ideal, existem vários modelos para caracterizar o comportamento hidrodinâmico do reator. Os que se usam com mais frequência são o modelo de dispersão e o de reatores agitados em série, porque são monoparamétricos e relativamente simples. O primeiro considera um fluxo pistão com diferentes graus de difusão, podendo no limite representar mistura completa. O segundo admite que o reator real se comporta como uma série de unidades ideais de mistura completa e com igual volume. Quando o fluxo no interior do reator é complexo, como no caso de reatores de leito móvel (por exemplo: leito fluidizado ou *air-lift*) usam-se, em geral, modelos multiparamétricos, que permitam representar os perfis das diferentes zonas no interior do reator.

Para ilustrar o interesse de conhecer o padrão hidrodinâmico de um reator, cita-se um estudo realizado em 2001, relativamente ao funcionamento de um reator de discos biológicos usado num processo de desnitrificação (Figura 16.3). Em resumo, neste estudo avaliou-se o efeito do tempo de residência hidráulico no padrão de fluxo do reator, tendo os autores testado os



Pormenor do biofilme formado nos discos biológicos

Figura 16.3 > Protótipo laboratorial de um reator de discos biológicos usado num processo de desnitrificação.

1 tempos de 0,5 h, 0,94 h e 2 h e verificado que
 2 era para o tempo mais elevado que se registava
 3 uma menor fração de volume morto, ou seja,
 4 de zonas de estagnação do fluido. Foi, assim,
 5 selecionado esse tempo de residência para
 6 operação do reator.

7 8 9 **16.3.2 > A importância** 10 **do tipo de traçador**

11
12 Os traçadores a usar podem ser de diferente
13 natureza, desde partículas magnéticas (ou
14 fluorescentes), até moléculas de corantes, mas,
15 no caso dos reatores de biofilme, é necessário
16 ter presente que o traçador, para além de não
17 interferir no padrão hidrodinâmico do reator,
18 também não pode ser metabolizável pelos
19 microrganismos constituídos no biofilme e
20 tem de ser facilmente detetável. É necessário,
21 ainda, ter em atenção que o biofilme tem
22 uma estrutura porosa e pode fazer retenção
23 do fluido no interior dos poros e que a taxa a
24 que o traçador entra e sai do biofilme pode
25 distorcer o perfil de distribuição de tempos de
26 residência e, conseqüentemente, traduzir-se
27 num padrão hidrodinâmico aparente. O retar-
28 damento na saída do traçador origina curvas
29 de distribuição de tempos de residência com
30 uma longa cauda.

31 Para obviar situações desta natureza, em
32 1986 foi proposto um tempo característico para
33 a difusão do traçador no interior do biofilme (τ_d)
34 dado por:

$$35 \tau_d = \frac{\delta^2}{D_e}$$

36
37
38 em que δ representa a espessura do biofilme e
39 D_e a difusividade do traçador.

40 De acordo com esta proposta, podem
41 ocorrer três situações distintas tendo em conta
42 o afastamento do tempo de residência em pre-
43

sença do traçador (τ_d) e o tempo de residência
se o reator não contivesse biofilme (τ):

- i. $\tau_d/\tau \geq 100$ – neste caso não há praticamente difusão do traçador no interior do biofilme, ou seja, a concentração do traçador no interior do biofilme é quase nula, pelo que o biofilme se comporta como um meio não poroso;
- ii. $\tau_d/\tau < 1$ – situação que corresponde a uma difusão muito rápida do traçador na estrutura do biofilme, sendo a concentração do traçador no interior do biofilme muito semelhante à existente no seio do fluido;
- iii. $0.1 < \tau_d/\tau < 100$ – representa a situação em que há variação do traçador no interior do biofilme à medida que o líquido flui no interior do reator, o que se traduzirá numa curva de distribuição de tempos de residência com uma longa cauda.

A facilidade de difusão do traçador no interior do biofilme depende da estrutura deste, sendo facilitada se o biofilme se encontrar mais hidratado e for mais poroso, o que é determinado pelas condições hidrodinâmicas e tensões de corte a que está sujeito.

A utilização de moléculas de elevado tamanho (por exemplo, dextrano azul), que possam ser excluídas da matriz, poderá ser uma metodologia que permita obter uma resposta mais próxima do comportamento real do fluido no interior do reator. Salienta-se, também, que um dos traçadores mais utilizados, o cloreto de lítio, devido à natureza não metabolizável do Li^+ e à facilidade de deteção, não é, provavelmente, muito adequado para reatores de biofilme, devido ao tamanho muito pequeno do ião lítio, que poderá ter muita tendência a ficar retido no interior da matriz do biofilme. Tanto mais que, quando a matriz é rica em polissacáridos, estes apresentam alguma carga negativa, o que pode favorecer o estabelecimento de alguma interação

1 eletrostática que contribuirá também para a
2 retenção do traçador.

3 4 5 **16.4 > Limitações** 6 **à transferência** 7 **de massa**

8
9 Os reatores de biofilme são reatores de bio-
10 massa imobilizada e têm, por isso, um com-
11 portamento semelhante aos reatores usados
12 em catálise heterogénea. Daqui decorre que
13 podem existir limitações difusionais à transfe-
14 rência de massa, tanto no acesso do substrato
15 aos microrganismos que se encontrem na
16 zona mais periférica do biofilme – limitações
17 difusionais externas – como à sua penetração
18 em profundidade no biofilme – limitações
19 difusionais internas.

20 As limitações difusionais externas dizem
21 respeito ao acesso do substrato à superfície do
22 biofilme e são, em geral, originadas pela baixa
23 difusividade de substratos de pesos molecu-
24 lares elevados. Em presença de um biofilme,
25 são as limitações difusionais internas que são
26 determinantes para a velocidade da reação,
27 porque esta é grandemente afetada pela difu-
28 sividade do substrato no interior da estrutura da
29 matriz. De facto, a porosidade e tortuosidade da
30 matriz regem o acesso ao substrato por parte
31 dos microrganismos que se encontram nas
32 zonas mais interiores do biofilme. Isto sugere
33 que as células no interior do biofilme devem
34 estar num estado metabólico diferente do das
35 células em estado planctónico, apresentando
36 também taxas máximas específicas de cresci-
37 mento diferentes, assim como constantes de
38 saturação, entre outros parâmetros que são
39 determinantes para se poder fazer o projeto
40 de um reator.

41 Por isso, o cálculo dos reatores de biofilme
42 é feito com base num conjunto de parâmetros
43 empíricos, obtidos em experiências anteriores.

Na realidade, não existem relações entre os con-
juntos de parâmetros habitualmente usados
e as variáveis operacionais e de projeto, tais
como a velocidade do líquido, a concentração
de substrato, o tempo de residência hidráulico,
as características do biofilme, etc. Mesmo os
modelos baseados numa abordagem fenome-
nológica não são muito usados em projeto de-
vido à não existência de coeficientes cinéticos
e de difusão que se possam considerar fiáveis.
Para situações relativamente simples, um só
substrato e uma única espécie microbiana, em
2011 foi apresentado um modelo de difusão-
reação para cálculo do volume de um reator
de biofilme, referindo os trabalhos de outros
autores no desenvolvimento de modelos para
situações mais complexas, multisubstratos e
biofilmes multiespécie.

A questão das limitações difusionais no
interior do biofilme, como já referido, está di-
retamente relacionada com a estrutura do bio-
filme, sendo esta fortemente influenciada pela
tensão de corte a que o biofilme está sujeito.
Os efeitos de velocidade, ou melhor dizendo,
os efeitos de turbulência no seio do fluido, têm
um papel significativo no desenvolvimento
e estabilidade dos biofilmes. A velocidade e
turbulência da corrente líquida em contacto
com as superfícies sólidas interfere com os
processos de adesão, transporte de substrato
e de desprendimento dos microrganismos
e, conseqüentemente, com o fenómeno de
desenvolvimento do biofilme. A velocidade do
fluido influencia ainda as taxas de transferência
de massa do seio do fluido para o biofilme,
bem como a taxa de desprendimento de por-
ções de biofilme.

Para baixas velocidades do fluido, nome-
adamente em regime laminar, a resistência à
transferência de massa do meio líquido para os
microrganismos embebidos no biofilme é mais
elevada, logo o crescimento do filme biológico
é prejudicado. O biofilme apresenta-se com um

1 aspeto mais espesso, mas menos compacto e
2 menos homogéneo (Figura 16.3).

3 À medida que a velocidade aumenta, au-
4 menta consequentemente a turbulência no seio
5 do líquido e a tensão de corte. Este aumento
6 traduz-se essencialmente em dois aspetos de
7 carácter oposto: por um lado, provoca um
8 aumento da transferência de massa do seio do
9 líquido para o biofilme que se poderá traduzir
10 por um aumento da taxa de desenvolvimento
11 do biofilme; por outro lado, ao aumentar a velo-
12 cidade aumentam também as forças de tensão
13 de corte que poderão causar maior erosão e
14 desprendimento de porções de biofilme e,
15 por consequência, diminuição da quantidade
16 de biomassa aderida. A redução em biomassa
17 origina biofilmes menos espessos ainda que
18 mais coesos, facto este que poderá beneficiar o
19 transporte dos nutrientes no interior do biofilme.

20 Elevadas velocidade e turbulência do fluido,
21 gerando tensões de corte elevadas, podem
22 também afetar a estrutura física dos biofilmes,
23 tornando-os, em particular em regime turbulen-
24 to, mais finos mas também mais densos e com
25 aspeto mais liso e compacto.

26 Tal como referido, a diferença de estrutura
27 também tem implicações a nível da estabilidade
28 do biofilme, pois quanto menos compacto é o
29 biofilme maior é a capacidade para se despren-
30 der. Este fenómeno não é de todo desejável,
31 principalmente nos reatores de tratamento de
32 efluentes, pois a qualidade do tratamento é
33 prejudicada pelo excesso de biomassa presente
34 na corrente de saída. Em determinados tipos
35 de reatores, por exemplo em reatores de discos
36 biológicos (Figura 16.1), a biomassa solta pode
37 mesmo obrigar a uma paragem do reator para se
38 efetuar a purga. Efetivamente, a tensão de corte
39 é um parâmetro decisivo para a determinação da
40 estrutura e consequente estabilidade do biofil-
41 me. No entanto, parâmetros ambientais como a
42 temperatura e o pH, a natureza do substrato e a
43 sua concentração, a par das especificidades dos

microrganismos, têm também um importante
contributo na estrutura e arquitetura do biofilme.

O biofilme desenvolve-se mais facilmente se a temperatura e o pH estiverem próximos dos valores ótimos de crescimento dos microrganismos, embora os valores no interior do biofilme variem relativamente aos do líquido circundante, devido às limitações difusionais. Destes parâmetros, o mais afetado é o pH porque sofre a influência dos metabolitos que são excretados em sentido contrário.

Em geral, uma elevada concentração de nutrientes ou uma elevada razão C/N conduzem a uma maior produção de matriz e, por isso, a biofilmes mais espessos, especialmente se os microrganismos forem heterotróficos. Em ensaios realizados no nosso laboratório, usando como suporte para a formação de biofilmes partículas de basalto com um diâmetro médio de 1 mm, verificou-se que num reator *air-lift* se conseguia obter, com um consórcio nitrificante, um conjunto extremamente homogéneo de “partículas” de biofilme. Neste caso, tratava-se de organismos autotróficos que não produzem quantidades muito elevadas de matriz extracelular e, por isso, as elevadas tensões de corte e a erosão provocada pelo contacto das partículas entre si geraram “partículas” com um aspeto esférico e muito homogéneo. Numa experiência semelhante levada a cabo com as mesmas partículas de basalto mas com uma bactéria desnitrificante (*Alcaligenes denitrificans*), que para além de ser heterotrófica, tem a capacidade de produzir elevadas quantidades de matriz extracelular, já não foi possível obter “partículas” de biofilme tão homogéneas. Fundamentalmente, isto deveu-se à grande quantidade de biofilme formado à volta das partículas de basalto, com uma estrutura muito menos compacta, que levava a que se destacassem grandes porções de biofilme. De facto, os biofilmes mais espessos e menos compactos são muito mais sujeitos aos fenómenos de desprendimento, mesmo na

1 ausência de tensões de corte, o que é devido
2 às forças de coesão mais fracas e à depleção de
3 nutrientes no interior do biofilme, porque não
4 chegam lá.

5
6
7
8
9

16.5 > A seleção do suporte

10 A primeira etapa na formação de um biofilme é
11 a adesão das células microbianas a um suporte
12 sólido, pelo que as propriedades físico-químicas
13 do suporte são determinantes para que se
14 estabeleça uma interação forte com os micror-
15 organismos, permitindo que o biofilme se possa
16 desenvolver a partir de uma primeira camada
17 de células fortemente aderidas e capazes de
18 resistir às tensões de corte a que ficam sujeitas,
19 principalmente em reatores agitados ou de leito
20 expandido. As propriedades físico-químicas que
21 mais influenciam a interação entre o suporte e
22 as células são a hidrofobicidade e a rugosidade
23 a carga elétrica superficial.

24 A hidrofobicidade da superfície do suporte é
25 talvez a propriedade que mais influência tem no
26 processo de adesão. De facto, existe um grande
27 número de estudos referidos na literatura que
28 demonstram que, em geral, quanto maior é o
29 grau de hidrofobicidade do suporte, maior é o
30 número de células aderidas. A título de exemplo,
31 refere-se um estudo que foi efetuado para sele-
32 cionar um suporte para um consórcio anaeróbio,
33 de entre os materiais: sepiolite, argila expandida,
34 pozolana e vidro expandido, no qual se verificou
35 que apesar de todos os materiais em causa se-
36 rem hidrofílicos, o número de células aderidas
37 foi maior para os materiais menos hidrofílicos.

38 A rugosidade e a porosidade dos suportes
39 podem ter, também, uma grande influência no
40 fenómeno de adesão. Para além das superfícies
41 rugosas ou porosas apresentarem uma maior
42 área superficial para a adesão, podem oferecer
43 também uma proteção contra as tensões de

corte, especificamente para os microrganismos
que ficam no interior dos poros ou nas zonas
mais profundas das irregularidades que deter-
minam a rugosidade. Por exemplo, nos ensaios
que foram efetuados para imobilizar o fungo
filamentoso *Phanerochaete chrysosporium*
num reator de biodiscos para tratamento do
efluente de uma refinaria de açúcar, testaram-se
quatro tipos distintos de suportes: policloreto de
vinilo (PVC), aço inox, espuma de poliuretano e
Scotch-Brite™, e observou-se a adesão de maior
quantidade de micélio aos dois últimos tipos de
materiais. Salienta-se que foi nas superfícies mais
texturadas que houve maior retenção de micélio,
provavelmente terá sido mais por oclusão da
biomassa do que propriamente por um fenó-
meno de adesão. Na realidade, se a superfície
apresentar poros ou imperfeições com tamanho
suficiente para que possa haver retenção de cé-
lulas microbianas, essas zonas serão preferenciais
para acumulação da biomassa que fica protegida
das forças externas de atrito e erosão geradas
pelo movimento do meio reacional.

A maior parte dos materiais, com exceção de
alguns hidróxidos metálicos, quando imersos em
meio aquoso a valores de pH próximos da neu-
tralidade, apresentam carga elétrica superficial
negativa. Assim, tanto os materiais de suporte,
como as células microbianas, têm geralmente
carga elétrica do mesmo sinal, o que tende a
contrariar as forças atrativas de van der Waals
que são responsáveis pela adesão. Há estudos
que demonstram que, em presença de iões
divalentes no meio, nomeadamente Mg^{2+} e Ca^{2+} ,
quanto mais negativa for a superfície do suporte,
mais favorecido é o fenómeno de adesão, neste
caso potenciado por uma ponte catiónica entre
a célula microbiana e o suporte.

Apesar de ser desejável a formação de
um biofilme bem desenvolvido e estável, é
necessário ter em atenção que se a espessura
do biofilme for muito elevada, se podem gerar
limitações à transferência de massa que podem

1 levar a um decréscimo da atividade do biofilme.
2 Na prática, este problema pode ser controlado
3 modificando as condições de operação, normal-
4 mente aumentando a velocidade de circulação
5 do meio líquido.

16.6 > Arranque do reator de biofilme

11 O processo de arranque de um biorreator de
12 biofilme pode ser uma etapa longa pois é
13 necessário proceder-se, numa primeira fase, à
14 colonização dos suportes sólidos pela adesão de
15 culturas microbianas simples ou mistas. Poste-
16 riormente, é necessário tempo para a maturação
17 do biofilme, isto é, para a reprodução das células
18 aderidas e produção da matriz polimérica extra-
19 celular segregada pelos próprios.

20 A duração do processo de arranque do
21 reator depende de vários fatores, tais como:
22 proveniência e concentração do inóculo inicial,
23 características específicas das espécies microbia-
24 nas (espécies fraca ou fortemente produtoras de
25 biofilme, taxas de crescimento, etc.), caracterís-
26 ticas do suporte sólido de adesão (rugosidade,
27 hidrofobicidade, etc.), aclimatação do inóculo
28 celular às condições de operação do biorreator
29 (meio de crescimento, temperatura, etc.).

30 Num reator de biofilme, para que ocorra a
31 adesão inicial dos microrganismos ao suporte
32 sólido, é necessário ultrapassar a competição
33 existente no interior do biorreator entre as
34 células planctónicas (isto é, desenvolvidas em
35 suspensão) e as células sésseis (isto é, que se
36 desenvolvem aderidas a um suporte sólido). Tal
37 é conseguido, normalmente, implementando-se
38 velocidades de fluido que conduzam à lavagem
39 das células em suspensão do sistema reacional
40 (em inglês, *wash-out*). O *wash-out* do sistema
41 consegue-se operando o reator de biofilme a
42 uma taxa de diluição superior à taxa específica
43 de crescimento dos microrganismos.

Para o arranque de um reator de biofilme é necessário garantir a existência de uma concentração de biomassa elevada no meio reacional. Normalmente, essa densidade celular é conseguida operando o biorreator, numa fase inicial, em modo descontínuo ou em modo contínuo, fazendo-se, neste caso, a alimentação do substrato a caudal muito baixo. Numa fase posterior, procede-se ao aumento gradual do caudal de alimentação do reator, diminuindo o tempo de residência hidráulico, de forma a remover do biorreator a biomassa suspensa e favorecer o desenvolvimento das células aderidas e, conseqüentemente, a formação e maturação do biofilme.

16.7 > Conclusão e perspectivas futuras

Tal como referido, todos os reatores biológicos que têm como principal denominador comum o facto da biomassa (células microbianas juntamente com as substâncias poliméricas por elas excretadas) estar fixada a suportes sólidos e não suspensa no meio líquido, são designados por reatores de biofilme. Os reatores de biofilme são, de um modo geral, bastante vantajosos uma vez que podem ser obtidas altas concentrações de biomassa mesmo para taxas de diluição elevadas. Este fator é especialmente significativo em situações onde a capacidade dos reatores para manter uma elevada concentração de microrganismos em suspensão é limitada. Com esta propriedade, supera-se a restrição segundo a qual a taxa de diluição não pode ultrapassar a taxa específica de crescimento dos microrganismos sob o risco de ocorrer lavagem da biomassa do sistema reacional. Pelo facto da biomassa estar aderida, o uso deste tipo de biorreatores pressupõe também uma menor exigência de operações de separação de sólidos a jusante do reator, bem como uma maior estabilidade do

1 reator face a variações das condições ambientais
2 envolventes.

3 Pelas razões apontadas, os reatores de
4 biofilme têm vindo a constituir uma alternativa
5 bastante promissora aos tradicionais processos
6 que operam com microrganismos em suspensão
7 ou com microrganismos imobilizados. A compa-
8 ração de reatores de biofilme com outros tipos
9 de reatores biológicos (por exemplo, reatores
10 de membrana e reatores de células imobiliza-
11 das) sugere que os reatores de biofilme são de
12 mais fácil operação, e por períodos de tempo
13 mais longos, oferecem uma elevada densidade
14 celular sem recurso a estruturas extra, como
15 membranas de retenção celular, obtendo-se,
16 conseqüentemente, elevadas taxas de biocon-

versão, com custos de produção mais reduzidos.
Estas características reforçam o potencial de
utilização de reatores de biofilme em processos
biotecnológicos, particularmente no tratamento
de águas residuais e efluentes e na produção,
por processos fermentativos, de bioprodutos,
como etanol e ácido acético. A estabilidade e as
altas taxas de produtividade conseguidas com
a operação de reatores de biofilme, resultantes
da elevada concentração de biomassa aderida,
estão na base da crescente utilização de protó-
tipos laboratoriais deste tipo de reatores para a
produção de outros bioprodutos, pelo que se
prevê que, a curto prazo, o seu potencial irá ser
considerado noutros processos industriais de
conversão biotecnológica.

19 NO FINAL DA LEITURA DESTE CAPÍTULO, O LEITOR DEVE:

- 20 > Saber identificar reatores de biofilme e as suas potencialidades;
- 21 > Compreender o modo de operação dos reatores de biofilme;
- 22 > Avaliar o padrão hidrodinâmico deste tipo de biorreator;
- 23 > Conhecer a importância do suporte sólido no processo de formação
24 do biofilme;
- 25 > Analisar as limitações difusionais à transferência de massa deste tipo
26 de biorreator;
- 27 > Compreender o arranque dos biorreatores de biofilme.

31 LEITURA RECOMENDADA

32 Qureshi, N., Annous, B.A., Thaddeus, C., Ezeji, T.C., Karcher, P. e Maddox, I.S. (2005). Biofilm reactors
33 for industrial bioconversion processes: employing potential of enhanced reaction rates. *Microbial*
34 *Cell Factories*, Vol. 4(24), pp. 1-21.

35 Nicolella, C., Van Loosdrecht, M.C. e Heijnen, S.J. (2000). Particle-based biofilm reactor technology.
36 *Trends in biotechnology*, Vol. 18(7), pp. 312-320.

37 Teixeira, J.A. e Fonseca, M.M. (Eds.) (2006) *Reactores biológicos – Fundamentos e Aplicações*,
38 Lidel, Lisboa.

39 Cabral, J.M.S., Mota, M. e Tramper, J. (Eds.) (2001). *Multiphase Bioreactor Design*, Taylor & Francis,
40 Londres.

41 Froment, G.F. e Bischoff, K.B., De Wilde, J. (Eds.) (1990). *Chemical Reactor Analysis and Design*, 2.^a
42 edição, John Wiley & Sons.

43 Levenspiel, O. (1999). *Chemical Reaction Engineering*, 3.^a edição, John Wiley & Sons.

1 Teixeira, P. e Oliveira, R. (2001). *Denitrification in a closed rotating biological contactor: effect of*
2 *disk submergence. Process biochemistry, Vol. 37(4), pp. 345-349.*

3 Melo, L.F e Oliveira, R. (2001) *Biofilm reactors*. In: Cabral, J.M.S., Mota, M. e Tramper, J. (Eds.) *Multi-*
4 *phase Bioreactor Design*. Harwood Academic Publishers, UK.

5 Stevens, D.K., Berthouex, P.M. e Chapman, T.W. (1986) *The effect of tracer diffusion in biofilm on*
6 *residence time distributions. Water Research, Vol. 20(3), pp. 369-375.*

7 Harremoes, P. e Henze, M. (1995) *Biofilters*. In: Henze, M., Harremoes, P., Jansen, J. la Cour e Arvin,
8 E. (Eds.) *Wastewater Treatment: Biological and Chemical Processes*. Springer-Verlag, Berlin.

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

35

36

37

38

39

40

41

42

43

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 30
- 31
- 32
- 33
- 34
- 35
- 36
- 37
- 38
- 39
- 40
- 41
- 42
- 43