

# 26 > Adesão microbiana a superfícies bióticas e abióticas

J. Azeredo<sup>1</sup>, M. Henriques<sup>1</sup>, J. Novello<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IBB – Instituto de Biotecnologia e Bioengenharia, Centro de Engenharia Biológica, Universidade do Minho, 4710-057 Braga, Portugal

<sup>2</sup>DTA – Departamento de Tecnologia de Alimentos, Centro de Ciências Exatas, Universidade Federal de Viçosa, 36570-000, Viçosa, Brasil

\*Autor para correspondência: [jazeredo@deb.uminho.pt](mailto:jazeredo@deb.uminho.pt)

## 26.1 > A importância da adesão na formação de biofilmes

A adesão de microrganismos a superfícies é um fenómeno que ocorre naturalmente em meios aquosos e que depende das propriedades superficiais dos suportes de adesão (carga superficial, hidrofobicidade e tensão superficial), das propriedades superficiais e dos microrganismos (exopolímeros, adesinas ou estruturas extracelulares) envolvidos na adesão e das propriedades do meio aquoso (presença de substâncias que podem condicionar as superfícies, pH e força iónica do meio). A adesão é considerada a primeira etapa da formação de biofilmes e, por isso, o estudo dos mecanismos de adesão e dos fenómenos de interação entre substratos e microrganismos assume um papel muito importante na ciência e engenharia de biofilmes. Este passo inicial da colonização microbiana pode ocorrer tanto em superfícies abióticas (quer dispositivos

médicos, quer materiais utilizados na indústria alimentar), como em superfícies bióticas (células do hospedeiro).

## 26.2 > Adesão a superfícies abióticas

Quando uma superfície sólida entra em contacto com uma solução, ocorre inicialmente a adsorção de macromoléculas presentes nessa solução (sais, proteínas e lípidos), que a revestem e a condicionam, provocando muitas vezes alterações nas suas propriedades superficiais. Por exemplo, as próteses dentárias ficam revestidas por compostos da saliva (mucina, lisozima e ureia), após a sua colocação na boca; as lentes de contacto quando inseridas nos olhos, ficam imediatamente condicionadas pelas proteínas da lágrima (lactoferrinas e lisozima) com consequente alteração da hidrofobicidade. Este fenómeno ocorre rapidamente e precede a

1 adesão microbiana, que pode dar-se em três  
2 fases (figura 26.1).

3

#### 4 **Fase 1 - Transporte até à superfície**

5 Em fluidos quiescentes (fluidos em repouso)  
6 ou na camada viscosa do fluxo turbulento, o  
7 transporte de microrganismos até à superfície  
8 pode fazer-se por difusão à custa de movi-  
9 mentos específicos, denominados *Brownianos*  
10 (deslocamento médio de 40  $\mu\text{m/h}$ ). Quando  
11 o transporte das células se faz num fluido em  
12 movimento, a aproximação dos microrganismos  
13 à superfície pode fazer-se por convecção. A  
14 velocidade do transporte convectivo é muito  
15 maior do que a do transporte por difusão.  
16 Finalmente, o transporte de microrganismos  
17 até à superfície pode ocorrer por movimento  
18 ativo dos mesmos quando possuem apêndices  
19 extracelulares, que lhes conferem mobilidade,  
20 como os pili ou flagelos.

21

#### 22 **Fase 2 - Adesão inicial**

23 Na vizinhança da superfície (50 nm), as cé-  
24 lulas e a superfície podem interatuar por forças  
25 de curto e longo alcance, conduzindo à adesão.  
26 Nesta fase do processo, a adesão pode ser rever-  
27 sível ou irreversível. A adesão é reversível quando  
28 o microrganismo, após estar fixo à superfície,  
29 continua a exibir movimentos *Brownianos* e  
30 pode ser removido por ação de forças de corte,  
31 ou pelo movimento ativo próprio da célula.  
32 Quando a célula se fixa irreversivelmente, deixa  
33 de poder ser removida facilmente da superfície  
34 e não exibe movimentos *Brownianos*.

35

36

37

38

39

40

41

42

43



43 **Figura 26.1** > Fases da adesão a superfícies.

### **Fase 3 - Fixação à superfície**

Após ocorrer a adesão inicial pode estabele-  
cer-se uma ancoragem firme entre a célula  
microbiana e o suporte a partir de ligações físico-  
químicas específicas (ligações covalentes, ióni-  
cas e pontes de hidrogénio) ou através de pon-  
tes estabelecidas por estruturas extracelulares  
específicas produzidas pelos microrganismos.  
Estas estruturas podem ser apêndices celulares  
filamentosos ou polímeros extracelulares. As  
ligações são normalmente mediadas por pontes  
poliméricas ou por componentes extracelulares  
específicos do microrganismo (adesinas) e rece-  
tores complementares localizados na superfície.

### **FORÇAS DE INTERAÇÃO ENVOLVIDAS NA ADESÃO**

As interações entre microrganismos e superfícies  
são efetuadas por um conjunto de fenómenos  
físico-químicos, termodinâmicos e microbioló-  
gicos. Existem algumas teorias que permitem  
quantificar variações de energia de interação  
entre as superfícies envolvidas. Contudo, ape-  
nas consideram os aspetos físico-químicos e  
termodinâmicos da adesão, omitindo o facto  
de os microrganismos serem superfícies vivas.  
Nas secções seguintes apresentam-se algumas  
teorias que descrevem a interação entre super-  
fícies, bem como os aspetos microbiológicos  
envolvidos na adesão a superfícies abióticas.

### **TEORIA DLVO**

A adesão de microrganismos a superfícies  
pode ser definida como a energia envolvida na

1 formação de uma ligação entre o suporte e a  
 2 célula. Portanto, a energia de adesão pode ser  
 3 quantificada como o trabalho necessário para  
 4 remover a célula e repô-la no seu estado original.

5 Uma vez que a maioria das bactérias não  
 6 excede os 2,0  $\mu\text{m}$  de comprimento, a sua den-  
 7 sidade é pouco superior à da água e possuem  
 8 uma carga global negativa, podem ser conside-  
 9 radas como partículas coloidais vivas e, conse-  
 10 quentemente, a adesão pode ser interpretada  
 11 de acordo com a teoria DLVO, desenvolvida por  
 12 *Derjaguin e Landau* (1941) e *Verwey e Overbeek*  
 13 (1948) para explicar a estabilidade de coloides  
 14 liofóbicos.

15 Segundo a teoria DLVO, a variação da energia  
 16 potencial total de interação entre dois corpos  
 17 ( $\Delta G_T$ ) é resultante da ação combinada entre as  
 18 forças atrativas de *van der Waals* ( $\Delta G_W$ ) e as forças  
 19 da dupla camada elétrica ( $\Delta G_{DL}$ ) (equação 1).  
 20 Uma vez que a maioria das superfícies adquire  
 21 carga negativa quando em solução, as forças da  
 22 dupla camada elétrica apresentam geralmente  
 23 um caráter repulsivo.

$$25 \quad \Delta G_T = \Delta G_W + \Delta G_{DL} \quad (\text{eq. 1})$$

## 27 FORÇAS DE VAN DER WAALS

28 Estão identificados três tipos de forças genera-  
 29 ralmente designadas por forças de *van der Waals*:

30 (i) dispersão de *London*, que ocorre quando dois  
 31 átomos se aproximam e se atraem devido a di-  
 32 polos instantâneos induzidos (alteração relativa  
 33 da posição do elétron em relação ao neutrão); (ii)  
 34 interações de *Debye*, que se manifestam quando  
 35 uma molécula que possui um dipolo que inte-  
 36 ratua com um átomo, criando-se uma situação  
 37 dipolo-dipolo induzido; (ii) interações de *Keesom*,  
 38 que se manifestam quando duas moléculas se  
 39 aproximam, criando interações dipolo-dipolo. A  
 40 intensidade das forças de interação de *van der*  
 41 *Waals* é diretamente proporcional ao tamanho  
 42 dos corpos interagentes e varia na razão inversa  
 43 da distância à superfície.

## FORÇAS DA DUPLA CAMADA ELÉTRICA

A maior parte dos sólidos, quando imersos  
 numa solução aquosa, adquire carga superficial  
 por ação de diversos mecanismos. No caso  
 de sistemas biológicos, a carga superficial  
 adquire-se por adsorção de iões ou por ioni-  
 zação de grupos superficiais. Este fenómeno  
 depende geralmente das propriedades da so-  
 lução aquosa, nomeadamente do pH, uma vez  
 que na superfície dos microrganismos existem  
 grupos ácidos (carboxilo e fosfato) e básicos  
 (grupos amina) que reagem com os iões  $\text{OH}^-$  e  
 $\text{H}_3\text{O}^+$  presentes na solução. Assim, em soluções  
 próximas da neutralidade, as bactérias possuem  
 uma carga global negativa em consequência  
 de haver um maior número de grupos fosfato e  
 carboxilo. Contudo, quando o pH é demasiado  
 baixo, estas podem apresentar uma carga global  
 positiva, por causa da predominância de grupos  
 amina. Nesse contexto, uma superfície de um  
 sólido eletricamente carregado, em contacto  
 com uma solução aquosa, atrai iões de sinal  
 contrário (contra-iões) do meio e, simultanea-  
 mente, repele os iões de sinal igual (co-iões). Este  
 mecanismo, juntamente com o efeito oposto  
 dos movimentos *Brownianos*, dá origem a uma  
 distribuição de *Poisson-Boltzmann* de iões atra-  
 vés da fase aquosa, criando uma camada difusa  
 denominada dupla-camada elétrica.

O potencial eletrostático que se estabelece  
 devido à diferente concentração de cargas no  
 interior da dupla camada tem a designação de  
 potencial da dupla camada elétrica e o seu valor  
 diminui à medida que a distância aumenta em  
 relação à superfície. Dessa forma, a uma distância  
 suficientemente grande, o potencial será igual  
 ao da solução, mas, por convenção, é definido  
 como sendo nulo.

A relação que descreve a energia potencial  
 de interação entre uma esfera (1) e uma placa (2)  
 plana ( $\Delta G_{DL\text{esfera/placa}}^{\psi}$ ) para potenciais de superfície  
 constantes, de acordo com a sua distância ( $H$ ) é  
 a seguinte:

$$\Delta G_{\text{Desfera / placa}}^{\psi} = \varepsilon \pi r \left[ (\psi_{01} + \psi_{02})^2 \ln(1 + \exp(-kH)) + (\psi_{01} - \psi_{02})^2 \ln(1 - \exp(-kH)) \right] \quad (\text{eq. 2})$$

onde  $\psi_{01}$  e  $\psi_{02}$  representam os potenciais de superfície da esfera 1 e da placa 2, respectivamente,  $\varepsilon$  a constante dielétrica do meio,  $r$  o raio da esfera e  $k$  o inverso da espessura da dupla camada, ou o parâmetro de *Debye-Hückel*. Esta equação só é válida para valores de potencial inferiores a 25 mV, mas pode ser utilizada com segurança até potenciais inferiores a 50 mV. O parâmetro de *Debye-Hückel* é expresso por:

$$k = \sqrt{\frac{2000 e^2 N_A I}{\varepsilon K_b T}} \quad (\text{eq. 3})$$

em que  $e$  representa a carga do eletrão,  $N_A$  o número de Avogadro,  $I$  a força iónica do meio,  $K_b$  a constante de *Boltzmann* e  $T$  a temperatura absoluta.

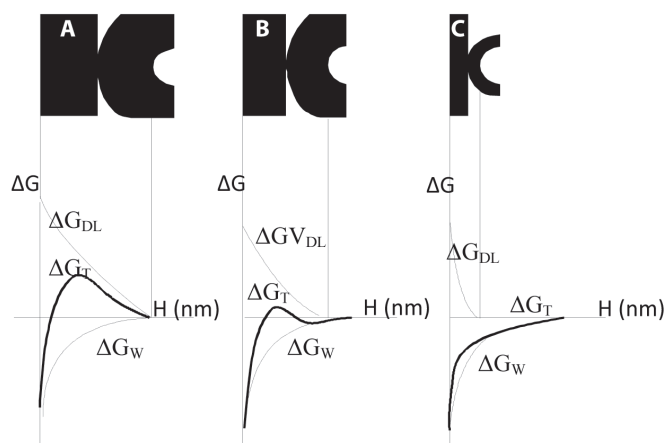
O potencial eletrostático à superfície dos corpos pode ser determinado através do ponto de carga nula segundo a equação de *Nernst*:

$$\psi_0 = \frac{2.303RT}{F} \log \frac{C}{C_{ZP}} \quad (\text{eq. 4})$$

em que  $C_{ZP}$  representa a concentração molar dos iões nas condições do ponto de carga nula e  $C$  a concentração molar dos iões da solução,  $F$  a constante de *Faraday*,  $R$  a constante dos gases perfeitos e  $T$  a temperatura absoluta.

Convencionou-se que as interações atrativas são negativas e as repulsivas positivas, portanto, ao contrário das interações de *van der Waals*, que possuem um sinal negativo, as interações da dupla camada elétrica são positivas. A soma destas duas contribuições resulta num perfil de energia potencial que depende da força iónica do meio (figura 26.2).

Quando a força iónica do meio é baixa (figura 26.2A), o perfil de energia potencial de interação entre dois corpos de sinal igual apresenta um máximo de energia (que representa uma barreira para a aproximação dos corpos) e um mínimo de energia, designado mínimo primário, que se localiza a uma distância inferior a 2 nm da superfície. A barreira de energia



**Figura 26.2.** Representação esquemática do perfil de energia potencial global ( $\Delta G$ ) de interação entre dois corpos, separados por uma distância ( $H$ ), de sinal igual segundo a teoria DLVO para forças iónicas do meio baixas **(A)**, intermédias **(B)** e elevadas **(C)**.

1 diminui quando se aumenta a força iônica do  
 2 meio, devido a uma diminuição da energia  
 3 potencial da dupla camada elétrica. Quando  
 4 a força iônica do meio apresenta valores in-  
 5 termédios (figura 26.2B), o máximo de energia  
 6 diminui e cria-se um mínimo secundário. Nestas  
 7 condições, o máximo de energia é geralmente  
 8 baixo e o seu valor é tanto menor quanto mais  
 9 pequena for a partícula. Portanto, uma fração de  
 10 partículas pode conter energia suficiente para  
 11 ultrapassar esta barreira de energia. Uma vez  
 12 ultrapassado o máximo de energia e atingido o  
 13 mínimo primário, a ligação entre os dois corpos  
 14 interatuantes torna-se irreversível. O mínimo  
 15 secundário situa-se aproximadamente a 10 nm  
 16 da superfície e pode ser tanto mais profundo  
 17 quanto maiores forem as forças atrativas de *van*  
 18 *der Waals* e conseqüentemente, quanto maior  
 19 for o tamanho das partículas. Contudo, se os  
 20 valores da força iônica do meio forem elevados  
 21 (figura 26.2C), a energia potencial de interação  
 22 será sempre negativa e, assim, todas as partículas  
 23 poderão atingir o mínimo primário.

24 Se ambas as partículas interatuantes tiverem  
 25 cargas de sinal oposto, as forças eletrostáticas  
 26 tornam-se atrativas. Neste caso, as partículas  
 27 podem aproximar-se do mínimo primário sem  
 28 qualquer dificuldade, resultando numa adesão  
 29 forte e irreversível.

30 A existência de dois mínimos de energia  
 31 permite distinguir entre adesão reversível e  
 32 irreversível. Quando o mínimo secundário é  
 33 atingido, a uma distância de separação não  
 34 nula, os microrganismos podem apresentar  
 35 movimentos *Brownianos* e serem removidos  
 36 facilmente da superfície. Neste caso, a adesão é  
 37 reversível. Mas os microrganismos que aderem  
 38 irreversivelmente no mínimo primário, já não  
 39 podem ser facilmente removidos da superfície.  
 40 Quando os microrganismos interatuantes são  
 41 bactérias, o mínimo secundário localiza-se entre  
 42 5 a 20 nm da superfície e não atinge valores  
 43 negativos muito elevados, sendo muito provável

a ocorrência de adesão reversível. A teoria DLVO  
 considera somente as forças de longo alcance  
 (forças de *van der Waals* e forças resultantes da  
 interação da dupla camada elétrica) e, portanto,  
 os desvios obtidos relativamente a esta teoria  
 têm sido explicados pela ação de forças de  
 curto alcance.

## TEORIA TERMODINÂMICA

O contacto entre um microrganismo (por exem-  
 plo uma bactéria) e uma superfície em solução  
 aquosa só se pode realizar se o filme de água  
 que reveste as duas superfícies for removido.  
 Portanto, a interface bactéria/líquido (b/l) e a  
 interface superfície/líquido (s/l) terão de ser  
 substituídas pela interface bactéria/superfície  
 de adesão (b/s). Segundo o modelo termo-  
 dinâmico, a energia livre permutada neste  
 fenómeno tende a ser minimizada e, portanto,  
 a adesão só se poderá verificar se o processo  
 conduzir a uma diminuição da energia livre  
 global. Neste modelo, não são consideradas as  
 interações eletrostáticas e as interações especí-  
 ficas mediadas por exopolímeros ou apêndices  
 extracelulares.

A energia livre de adesão ( $\Delta G_{\text{adesão}}$ ) permuta-  
 da na substituição das interfaces é definida pela  
 equação modificada de *Dupré* (eq. 5).

$$\Delta G_{\text{adesão}} = \gamma_{\text{bs}} - \gamma_{\text{bl}} - \gamma_{\text{sl}} \quad (\text{eq. 5})$$

Nesta equação,  $\gamma_{\text{bs}}$  corresponde à tensão  
 interfacial bactéria/superfície,  $\gamma_{\text{bl}}$  corresponde  
 à tensão interfacial bactéria/líquido e  $\gamma_{\text{sl}}$  cor-  
 responde à tensão interfacial superfície/líquido.

As teorias até agora apresentadas permiti-  
 m interpretar parcialmente os fenómenos de  
 adesão. A primeira teoria apresentada, teoria  
 DLVO, explica a adesão de microrganismos com  
 base na interação entre partículas coloidais e  
 despreza todos os aspetos microbiológicos  
 da adesão. Nesta teoria, as forças de interação  
 contabilizadas são fundamentalmente forças de

1 longo alcance e, portanto, só preveem se os mi-  
 2 croorganismos se aproximam a certa distância da  
 3 superfície. Por outro lado, forças de curto alcan-  
 4 ce, também conhecidas como forças não DLVO  
 5 (pontes poliméricas, interações estéricas, forças  
 6 de hidratação, forças resultantes das interações  
 7 hidrofóbicas), permitem justificar os desvios da  
 8 teoria DLVO. Contudo, este tipo de interações  
 9 (com a exceção das interações hidrofóbicas) não  
 10 são facilmente quantificáveis.

11 A segunda teoria apresentada – teoria  
 12 Termodinâmica – permite quantificar a energia  
 13 envolvida na adesão e assim prever de forma  
 14 quantitativa a possibilidade de se estabelecer  
 15 uma interface entre a superfície de adesão e o  
 16 microrganismo. Mas, nesta teoria, as interações  
 17 eletrostáticas não são contabilizadas e são muito  
 18 importantes em meios aquosos. Por isso, esta só  
 19 pode ser aplicada se a barreira de energia que  
 20 separa as duas superfícies for ultrapassada.

21 Em 1994, *van Oss* publicou uma súmula de  
 22 uma extensão à teoria DLVO para explicar a in-  
 23 teração entre partículas, que integra os aspetos  
 24 termodinâmicos da adesão com a teoria DLVO,  
 25 que se designa por teoria xDLVO.

## 26 27 **TEORIA xDLVO**

28 Quando duas partículas ou macromoléculas  
 29 imersas numa solução aquosa se aproximam,  
 30 as primeiras forças de interação que se estabe-  
 31 lecem entre as duas superfícies designam-se por:

- 32 > Interações eletrodinâmicas ou apolares ou  
 33 de *Lifshitz-van der Waals* (interações LW);
- 34 > Interações polares ou interações ácido-base  
 35 de *Lewis* (interações AB);
- 36 > Interações eletrostáticas resultantes da  
 37 sobreposição das duplas camadas elétricas  
 38 (interações DL);
- 39 > Interações resultantes dos movimentos  
 40 *Brownianos* (interações BR).

41  
 42 A energia livre total ( $\Delta G^{\text{TOT}}$ ) destas interações  
 43 é resultante do somatório das energias livres de

cada uma das forças de interação, segundo a  
 equação seguinte:

$$\Delta G^{\text{TOT}} = \Delta G^{\text{LW}} + \Delta G^{\text{AB}} + \Delta G^{\text{DL}} + \Delta G^{\text{BR}} \quad (\text{eq. 6})$$

A energia livre da interação de *Lifshitz-van der Waals* entre um microrganismo (m) e uma superfície sólida (s), ambos imersos num meio líquido (l), calcula-se com base nas componentes apolares das tensões superficiais das entidades interagentes, de acordo com a equação seguinte:

$$\Delta G_{ms}^{\text{LW}} = -2\gamma_l^{\text{LW}} - 2\sqrt{\gamma_m^{\text{LW}}\gamma_s^{\text{LW}}} + 2\sqrt{\gamma_m^{\text{LW}}\gamma_l^{\text{LW}}} + 2\sqrt{\gamma_s^{\text{LW}}\gamma_l^{\text{LW}}} \quad (\text{eq. 7})$$

Esta energia livre varia com a distância entre as superfícies interagentes, sendo mais atrativa quando as duas entidades (microrganismo e superfície sólida) estão próximas. A expressão que permite calcular a variação da energia livre de *Lifshitz-van der Waals* de uma partícula esférica em função da distância (H) é a seguinte:

$$\Delta G_{ms}^{\text{LW}} = \frac{-A_{ms}r}{6H} \quad (\text{eq. 8})$$

Em que  $A_{ms}$  representa a constante de Hamaker, entre o microrganismo (m) e a superfície do material (s) quando no seio de um líquido (l). Estas interações dependem das interações que ocorrem entre cada par de fatores de acordo com a equação 10.

Em meios aquosos, as forças de interação polares são devidas principalmente a interações entre doadores e aceitadores de elétrons que representam interações do tipo ácido-base de *Lewis*, geralmente designadas AB.

Num sistema trifásico, a interação polar entre um microrganismo (m) e uma superfície sólida (s), ambos imersos num meio líquido (l), calcula-se com base nas componentes polares das tensões superficiais das entidades interagentes, de acordo com a equação seguinte:

$$\Delta G_{ms}^{AB} = 2\left[\sqrt{\gamma_i^-}(\sqrt{\gamma_m^-} + \sqrt{\gamma_s^-} - \sqrt{\gamma_i^-}) + \sqrt{\gamma_i^+}(\sqrt{\gamma_m^+} + \sqrt{\gamma_s^+} - \sqrt{\gamma_i^+}) - \sqrt{\gamma_m^+ \gamma_s^+} - \sqrt{\gamma_m^- \gamma_s^-}\right] \quad (\text{eq. 9})$$

As interações polares diminuem com a distância (H) à superfície da partícula para valores de H aproximadamente superiores a 1 nm, de acordo com a expressão seguinte:

$$A_{132} = \left(\sqrt{A_{11}} - \sqrt{A_{33}}\right)\left(\sqrt{A_{22}} - \sqrt{A_{33}}\right) \quad (\text{eq. 10})$$

Neste caso  $\Delta G_{H_0}^{AB}$  representa a energia livre polar de coesão de uma substância à distância  $H_0$ ; este valor pode ser determinado pela equação 9.  $\lambda$  representa a distância de interação das moléculas do líquido; para a água, o valor de  $\lambda$  encontrado foi de 1.0 nm.

Os parâmetros  $A_{ii}$  dependem da tensão superficial de acordo com a equação 11.

$$A_{ii} = 2\gamma_i^{LW} \times 12\pi H_0^2 \quad (\text{eq. 11})$$

## OUTRAS INTERAÇÕES

Com base na teoria DLVO, as forças eletrostáticas entre microrganismos e superfícies de adesão são repulsivas, considerando que, em meio aquoso, a maior parte dos microrganismos apresenta uma superfície com carga iónica negativa, assim como grande parte das superfícies de adesão. Se a força iónica do meio não for muito elevada, o perfil de energia potencial de interação é caracterizado por uma barreira de energia (figura 26.2B) que dificulta a aproximação das superfícies necessárias para se estabelecerem interações de curto alcance (até 0,3 nm de distância) responsáveis pela adesão firme. Nestes casos, a interação entre microrganismos e superfícies só poderia ocorrer no mínimo secundário (5 a 20 nm da superfície) e, por conseguinte, a adesão seria reversível. Contudo, muitos microrganismos aderem firmemente a superfícies sólidas em ambientes aquosos de baixa força iónica. Nestas

situações, a adesão pode ser explicada pelo facto dos microrganismos poderem ser móveis ou mesmo apresentarem estruturas extracelulares, tais como fimbrias ou pelos, capazes de ultrapassar a barreira de energia imposta pelas forças eletrostáticas repulsivas.

Outro facto que favorece a adesão de microrganismos é a síntese de polímeros extracelulares. Estes, por sua vez, são substâncias excretadas por muitas bactérias para o meio ambiente que podem ficar firmemente aderidas à parede da célula, o que resulta na formação de exopolímeros capsulares (CPS, do inglês *Capsular Polymeric Substances*) ou de uma camada mucosa a envolver a célula (glicocálice).

Os CPS e o glicocálice são substâncias poliméricas constituídas por polímeros mucopoliproteicos e fundamentalmente por heteropolissacáridos.

A produção de polímeros está associada à adesão irreversível das bactérias a superfícies. Este facto tem sido provado pela observação de material polimérico remanescente na superfície de adesão quando se procede à remoção artificial das bactérias aderidas. Este material polimérico é considerado o vestígio de adesão das bactérias, tendo sido por isso denominado por *footprints*. O carácter irreversível das interações poliméricas pode ser explicado pelo facto de a maior parte dos exopolímeros ser constituída por aproximadamente  $10^5$  unidades. Como 30 a 60% destas unidades podem estabelecer ligações fracas com a superfície, o conjunto total destas ligações fracas resulta numa forte ligação do polímero à superfície, facto que aparentemente é responsável pela sua adsorção irreversível. Da mesma maneira, quando uma célula envolvida por exopolímeros se aproxima de uma superfície, as cadeias poliméricas possuem energia suficiente que lhes permite

1 ultrapassarem a barreira de energia e estabelecer  
 2 ligações fracas com a superfície, resultando no  
 3 conjunto numa interação irreversível entre as  
 4 duas superfícies.

### 7 26.3 > Adesão a superfícies 8 bióticas

10 Além das superfícies abióticas (como os disposi-  
 11 tivos médicos), sabe-se que os microrganismos  
 12 patogénicos aderem igualmente à superfícies  
 13 bióticas do hospedeiro, como as células epite-  
 14 liais que revestem as mucosas e a maioria dos  
 15 tecidos, as células endoteliais que revestem as  
 16 veias, artérias e todos os vasos sanguíneos, os  
 17 fibroblastos que fazem parte dos tecidos mus-  
 18 culares e as células ósseas. Muitas vezes, esta  
 19 colonização das superfícies bióticas é devida  
 20 ao desprendimento das células dos biofilmes,  
 21 formados nos dispositivos médicos e/ou im-  
 22 plantes, que podem colonizar outros locais mais  
 23 distantes. Por outro lado, a adesão às superfícies  
 24 bióticas (como dentes ou gengivas), pode dar  
 25 origem à colonização dos dispositivos externos  
 26 ao corpo, como por exemplo um implante  
 27 dentário.

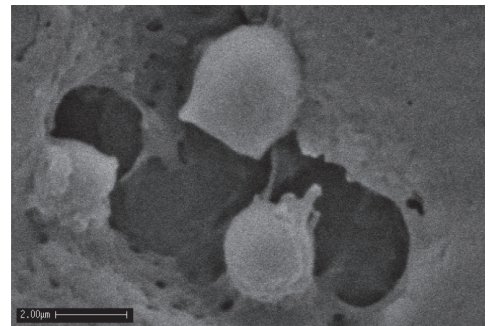
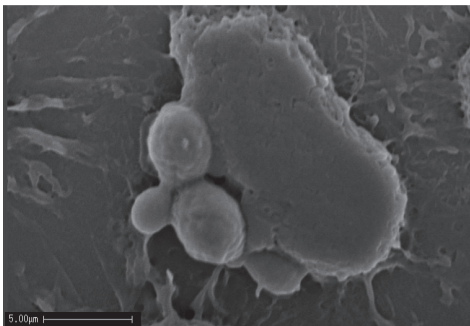
28 Apesar das interações não-específicas (como  
 29 a hidrofobicidade e carga superficial) poderem  
 30 estar relacionadas com esta adesão, geralmente

as interações específicas, como as forças de  
 ligação entre os microrganismos e as células  
 animais ou a sua matriz celular (figura 26.3), são  
 as mais importantes.

Tantos os microrganismos como as células  
 do hospedeiro possuem compostos, que po-  
 dem ser proteínas ou hidratos de carbono, e  
 que são reconhecidos entre eles, promovendo  
 a adesão. Nos microrganismos estas moléculas  
 (designadas por adesinas) são responsáveis por  
 mediar a interação com as células animais e  
 podem ocorrer nos pili, flagelos ou na superfície  
 celular. Nas células animais estes compostos  
 denominam-se moléculas de adesão celular  
 (CAM, do inglês *Cell Adhesion Molecules*). As CAM  
 são recetores que regulam as interações célula-  
 célula ou célula-matriz extracelular. Geralmente  
 estas moléculas são classificadas em 4 grupos  
 principais: integrinas, caderinas, membros da  
 família das imunoglobulinas e selectinas.

### 26.4 > Conclusões

Embora muitas teorias ajudem a explicar os  
 mecanismos de adesão dos microrganismos  
 às superfícies, o processo de interação célula/  
 superfície é complexo e multifatorial e, em  
 muitos casos, não é descrito somente por estas  
 teorias. Isso ocorre porque normalmente há



42 **Figura 26.3.** Imagem de microscopia eletrônica de varrimento de leveduras de **Candida**  
 43 **albicans** aderidas a células epiteliais.



1 adsorção de compostos orgânicos e inorgânicos às superfícies antes da adesão microbiana, formando o chamado filme condicionante. Além disso, estas teorias consideram o microrganismo como uma partícula coloidal, não como um ser vivo capaz de produzir exopolissacarídeos e emitir apêndices celulares de forma a alterar as condições iniciais de adesão.

## 7 NO FINAL DA LEITURA DESTE CAPÍTULO, O LEITOR DEVE:

- 8 > Descrever as etapas de adesão dos microrganismos;
- 9 > Compreender as teorias DLVO, termodinâmica e xDLVO, utilizadas para descrever as interações entre microrganismo e superfícies abióticas;
- 10 > Identificar as propriedades físico-químicas e biológicas dos microrganismos que estão envolvidos na adesão.

## 15 LEITURA RECOMENDADA

- 16 Azeredo, J., Visser, J., Oliveira, R. (1999). *Colloids and surfaces B: Biointerfaces*, 14, 141-148.
- 17 Azeredo, J., Oliveira, R. (2000). *Biofouling*, 16, 59-67.
- 18 Azeredo, J., Oliveira, R. (2003). In *biofilms in medicine, industry and environmental biotechnology - characteristics, analysis and control*, Lens, P., Moran, A. P., Mahony, T., Stoodley, P., O' Flaherty, V. (eds.), IWA Publishing, London, 16-31.
- 21 Boyle E. e Finlay B. (2003). *Current opinion in cell biology*, 15(5):633-639.
- 22 Henriques, M., Azeredo, J., Oliveira, R. (2006). *Critical reviews in microbiology*, 32, 217-226.
- 23 Santos, L., Rodrigues, D., Lira, M., Real Oliveira, M. E. C. D., Oliveira, R., Vilar, E. Y.-P., Azeredo, J. (2007) *Contact lens & anterior eye* 30, 183-18.
- 25 Henriques M., Azeredo J., Oliveira R., (2007). *Mycoses*, 50:5, 391-396.
- 26 Oliveira, R., Azeredo, J., Teixeira, P. (2003). in *An interdisciplinary approach*, Wuertz, S., Bishop, P. L., Wilderer, P. A. (eds.) IWA Publishing, London, 211-231.
- 28 Poortinga, A. T., Bos, R., Norde, W. and Busscher, H. J. (2002). *Surface science reports* 47:1-32.

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