



EDUCAÇÃO CIÊNCIA E SAÚDE
<http://dx.doi.org/10.20438/ecs.v7i2.286>

ASPECTOS TEÓRICOS DA DEPOSIÇÃO ELETROFORÉTICA DE REVESTIMENTOS DE QUITOSANA

José Anderson Machado Oliveira¹, Danilo Lima Dantas², Renato Alexandre Costa de Santana³, Ana Regina Nascimento Campos⁴, Alcides de Oliveira Wanderley Neto⁵

¹ Curso de Doutorado em Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil.

² Cursos de Doutorado em Química, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Pernambuco, PE, Brasil.

³ Prof. Unidade Acadêmica de Biologia e Química, Universidade Federal de Campina Grande, Cuité, PB, Brasil.

⁴ Prof^a. Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.

⁵ Prof. Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil.

Email para correspondência: jmo.anderson@gmail.com

Resumo

A quitosana é um polissacarídeo de origem natural que pode ser obtido por uma reação de desacetilação alcalina da quitina. Possui excelentes propriedades como biocompatibilidade, biodegradabilidade, atividade antibacteriana, baixa toxicidade e boa capacidade de formação de filme que a torna um potencial candidato para produção de materiais aplicados em diferentes setores tecnológicos. O objetivo deste trabalho é apresentar de forma sucinta os principais aspectos teóricos envolvidos no processo de obtenção de revestimentos à base de quitosana obtidos pela técnica de deposição eletroforética, baseando-se em resultados disponíveis na literatura científica, tendo em vista a grande capacidade de aplicação dos revestimentos de quitosana em diferentes setores tecnológicos e industriais.

Palavras-chave: Quitosana, Deposição Eletroforética, Eletroquímica.

Abstract

Chitosan is a polysaccharide of natural origin that can be obtained by an alkaline deacetylation reaction of chitin. It has excellent properties such as biocompatibility, biodegradability, antibacterial activity, low toxicity, and good film formation capacity that make it a potential candidate for the production of materials applied in different technological sectors. The objective of this work is to briefly present the main theoretical aspects involved in the process of obtaining chitosan-based coatings obtained by the electrophoretic deposition technique, based on results available in the scientific literature, in view of the great application capacity of the chitosan coatings in different technological and industrial sectors.

Keywords: Chitosan, Electrophoretic Deposition, Electrochemistry.

1 Introdução

A quitosana é um biopolímero semissintético que pode ser obtido da quitina por uma reação de desacetilação alcalina (SORKHI; FARROKHI-RAD; SHAHRABI, 2014; CLAVIJO et al., 2016). É constituída por monômeros de D-glucosamina (monômero desacetilado) e N-acetil-D-glucosamina (monômero acetilado) unidos por ligações $\beta(1\rightarrow4)$ glicosídicas (CHEKIN et al., 2012; KHALILI et al., 2017; AVCU et al., 2019). A quitina pode ser encontrada em diferentes fontes naturais como conchas de crustáceos, paredes celulares de fungos e cutículas de insetos (YANAN et al., 2018). Devido às suas excelentes propriedades como, por exemplo, biocompatibilidade, biodegradabilidade, atividade antibacteriana, baixa toxicidade e excelente capacidade de formação de filme, materiais à base de quitosana pura, ou na forma de materiais compósitos, podem ser aplicados em diferentes setores tecnológicos para produção de materiais biomédicos, na indústria alimentícia, têxtil e de cosméticos, na agricultura, entre outras aplicações (LI et al., 2011; CHENG et al., 2012; GEBHARDT et al., 2012; EL-HADDAD, 2013; CLIFFORD; PANG; ZHITOMIRSKY, 2018).

Revestimentos de quitosana podem ser obtidos utilizando a técnica de deposição eletroforética (EPD – do inglês “*electrophoretic Deposition*”). Esta técnica é um método eletroquímico bastante utilizado para obtenção de revestimentos formados por diferentes materiais como, por exemplo, revestimentos metálicos, poliméricos, cerâmicos e compósitos aplicados em diversos setores tecnológicos (BOCCACCINI, 2006). As principais vantagens da deposição eletroquímica em comparação com outras técnicas de deposição encontram-se na possibilidade de obter revestimentos na forma de filmes finos ou espessos (espessuras variando na faixa de 0,1 μm a maiores de 100 μm), com propriedades físicas e químicas controladas por meio do ajuste dos parâmetros de deposição como potencial elétrico (ou densidade de corrente), pH da solução ou suspensão eletrolítica, tempo de deposição e concentração dos reagentes. Além disso, a técnica permite depositar revestimentos homogêneos, mesmo sobre substratos com formas geométricas complexas,

utilizando equipamentos simples e de baixo custo (BOCCACCINI et al., 2010; BAKHSHANDEH; AMIN YAVARI, 2018; AVCU et al., 2019).

A Figura 1 apresenta uma imagem da seção transversal de um revestimento formado por um compósito à base de quitosana, obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizada como exemplo de um revestimento de quitosana obtido por EPD.

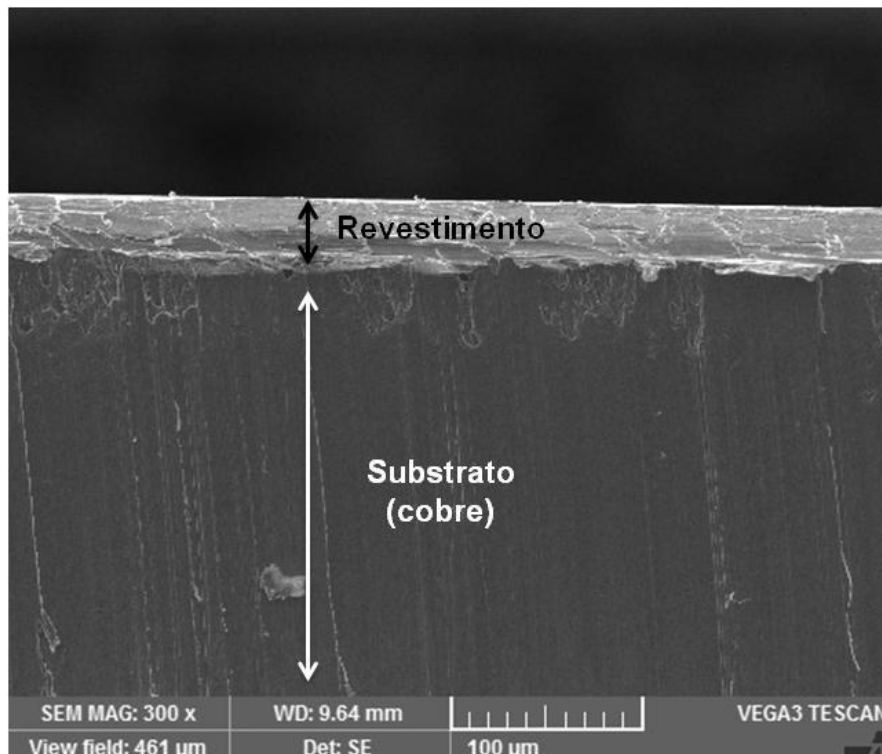


Figura 1: MEV (seção transversal) de um revestimento composto à base de quitosana obtido por deposição eletroforética.

Fonte: Arquivo pessoal.

Neste trabalho serão apresentados os principais aspectos teóricos envolvidos no processo de obtenção de revestimentos à base de quitosana utilizando a técnica de deposição eletroforética, baseando-se em resultados publicados em artigos científicos. Portanto, o objetivo principal é apresentar de forma resumida as principais informações disponíveis na literatura científica com o intuito de orientar futuras pesquisas voltadas ao desenvolvimento de materiais à base de quitosana, tendo em vista a ampla margem de aplicações desse biopolímero natural.

2 Deposição Eletroforética

A técnica de deposição eletroforética é um tipo de deposição eletroquímica muito utilizada para formação de filmes utilizados como revestimento em diversas aplicações. A técnica baseia-se em um processo eletroquímico envolvendo a movimentação ou migração de partículas em escala coloidal, dispersas ou dissolvidas em suspensões/soluções estáveis, na direção de eletrodos com carga elétrica oposta (cátodo ou ânodo), dependendo da carga da partícula (íon ou molécula), por meio de um campo elétrico aplicado. O termo eletrodeposição também é frequentemente utilizado como sinônimo para se referir ao processo de deposição eletroquímica, contudo, a escolha do termo pode ser definida de acordo com as características das espécies envolvidas e com relação ao mecanismo governante no processo de deposição. (BESRA; LIU, 2007; BOCCACCINI et al., 2010; BAKHSHANDEH; AMIN YAVARI, 2018; AVCU et al., 2019).

De acordo com Avcu et al., (2019) os primeiros experimentos utilizando a técnica de deposição eletroforética são atribuídos ao cientista indiano G. M. Bose em 1740. Já o entendimento sobre o fenômeno associado à eletroforese (movimentação de partículas carregadas em direção a cargas opostas) foi descrito apenas no início do século XIX por meio das descobertas feitas pelo cientista russo Ruess, relacionadas ao movimento que partículas de argila em água apresentavam sob a influência de um campo elétrico. No entanto, a utilização prática da técnica remota ao ano de 1927 quando Harsanyi utilizou o procedimento para depositar óxido de tório (IV) e tungstênio para aplicações em tubos elétricos. Já sua utilização em escala industrial ganhou força apenas a partir dos anos 1950 quando passou a ser utilizada na deposição de revestimentos cerâmicos (BESRA; LIU, 2007).

O sistema convencional utilizado para deposição é relativamente simples, sendo constituído geralmente por dois eletrodos, um deles atuando como substrato de deposição e o outro como contra eletrodo, conectados a uma fonte de energia externa e imersos em uma suspensão ou solução eletrolítica estável contendo as espécies reagentes ou partículas que serão depositadas. Os revestimentos podem ser obtidos utilizando corrente direta (CD), alternada (CA) ou pulsada (CP), sendo a corrente direta geralmente mais utilizada. A

escolha depende das características do material que será depositado, pois a forma como a corrente e/ou potencial será aplicado no sistema influenciará diretamente nas propriedades do filme depositado (BESRA; LIU, 2007; BAKHSHANDEH; AMIN YAVARI, 2018; AVCU et al., 2019).

O processo de deposição acontece em duas etapas: a primeira etapa é a eletroforese, onde as partículas carregadas (íons: cátions ou ânions) dispersas em um solvente ou solução migram na direção do eletrodo de carga oposta (substrato de deposição). Na segunda etapa, as partículas depositam-se de forma ordenada sobre a superfície do eletrodo de trabalho por um processo que depende do mecanismo envolvido, formando um depósito na forma de um filme (revestimento). As partículas com carga positiva migram e depositam-se sobre o cátodo (eletrodo com carga negativa), já as partículas com carga negativa depositam-se sobre o ânodo (BESRA; LIU, 2007; BAKHSHANDEH; AMIN YAVARI, 2018; AVCU et al., 2019). A Figura 2 apresenta uma esquematização do sistema e do processo de deposição eletroforética e/ou eletrodeposição.

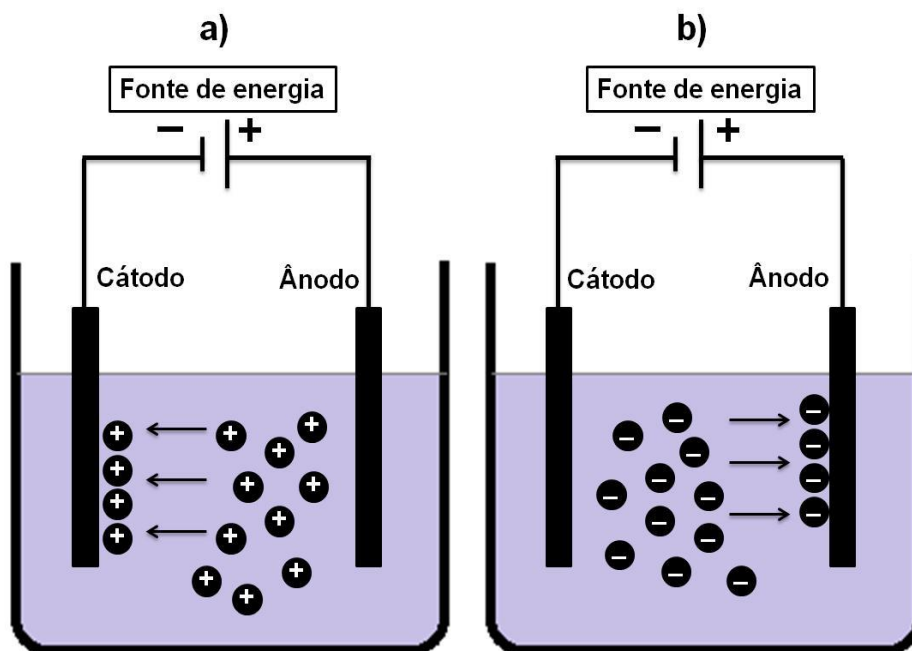


Figura 2: Processo de deposição eletroforética: a) sobre o cátodo e b) sobre o ânodo.

Fonte: Adaptado de Besra e Liu (2007); Bakhshandeh e Amin Yavari (2018); Avcu et al., (2019).

A base teórica para descrever a cinética do processo de deposição eletroforética baseia-se na Lei de Hamaker (Equação 1). A lei estabelece a correlação entre os principais parâmetros envolvidos no processo de deposição e a massa (rendimento do processo) (BESRA; LIU, 2007; DIBA et al., 2016; AVCU et al., 2019).

$$w(t) = \int_{t_0}^t f\mu EACdt \quad (1)$$

Sendo w (g.cm^{-1}) o rendimento da deposição, f o coeficiente de eficiência de deposição ($f \leq 1$; $f = 1$ quando todas as partículas que alcançarem o eletrodo se depositarem), μ ($\text{cm.s}^{-1}/\text{V.cm}^{-1}$) a mobilidade eletroforética, E (V) o campo elétrico, A (cm^2) a área da superfície dos eletrodos, C (g.cm^{-3}) a concentração da suspensão e t (s) o tempo de deposição. A Equação 2 pode ser obtida integrando a Equação 1 com relação ao tempo (com $t_0 = 0$), utilizado no processo de deposição eletroforética (HAMAKER, 1940; SARKAR; NICHOLSON, 1996).

$$w(t) = f\mu EACt \quad (2)$$

Observa-se nesta equação uma relação direta entre o campo elétrico aplicado na deposição eletroforética e o rendimento do processo de deposição. Dessa forma, nota-se que as Equações 1 e 2 são válidas apenas quando uma condição de estado estacionário é alcançada dentro de uma determinada faixa de campo elétrico, sendo o limite inferior igual à tensão mínima necessária para deposição das partículas e o limite superior igual a tensão máxima em que a Lei de Ohm é válida para a suspensão eletrolítica. Portanto, a utilização de elevadas voltagens ou grandes períodos de tempo de deposição podem levar a desvios na linearidade prevista na Lei de Hamaker, devido à diminuição na taxa de deposição (rendimento) causada pelo aumento na espessura do revestimento que apresenta na maioria das vezes um caráter intrinsecamente isolante; assim sendo, o campo elétrico e o tempo de deposição podem ser

considerados parâmetros limitantes da Lei de Hamaker (HAMAKER, 1940; SARKAR; NICHOLSON, 1996; DIBA et al., 2016).

O interesse na utilização da técnica de deposição eletroforética para produção de uma ampla variedade de materiais vem aumentando nos últimos anos, tanto no setor acadêmico quanto no setor industrial. Esse crescente interesse justifica-se devido às vantagens e facilidades oferecidas pela técnica, que permitem a produção de uma ampla variedade de estruturas simples e avançadas. Entre as inúmeras aplicações da técnica, algumas classes mais abrangentes podem ser destacadas como, por exemplo, a produção de materiais compósitos (em escala micro ou nano-estruturadas), de materiais cerâmicos, revestimentos poliméricos e metálicos, na deposição de nanotubos, na produção de células solares, revestimentos resistentes à corrosão, produção de suportes para catalisadores, sensores, biomateriais, entre outras aplicações (BOCCACCINI, 2006; BESRA; LIU, 2007). Cabe destacar que dentro de cada uma dessas classes citadas existem outras inúmeras aplicações específicas, dessa forma, o desenvolvimento de pesquisas, focadas tanto na otimização dos parâmetros envolvidos no processo de deposição quanto na investigação de novos materiais torna-se importante, tendo em vista a crescente demanda na produção de tecnologias mais avançadas e inovadoras que acompanhem o desenvolvimento tecnológico e industrial atual.

3 Deposição Eletroforética de Quitosana

A quitosana possui uma característica intrínseca que permite sua utilização para produção de materiais e/ou revestimentos utilizando a técnica de deposição eletroforética. Essa característica é sua capacidade de formar um polieletrólito catiônico em soluções ácidas, pois, apesar de ser insolúvel em água e solventes orgânicos, a quitosana pode ser solubilizada em soluções aquosas de ácido diluídas ($\text{pH} < 6$) através da protonação de seus grupos amina primários ($-\text{NH}_2$) presentes na posição C-2 (carbono 2) da unidade repetida D-glucosamina na cadeia polimérica (Figura 3), dessa forma, a quitosana pode ser considerada uma base relativamente forte nessas condições experimentais devido ao seu valor de pK_a (6,3). A Equação 3

apresenta uma forma simplificada de representar o mecanismo de protonação e solubilização da quitosana em soluções ácidas (BOCCACCINI et al., 2010; ZARGAR et al., 2015; AVCU et al., 2019).

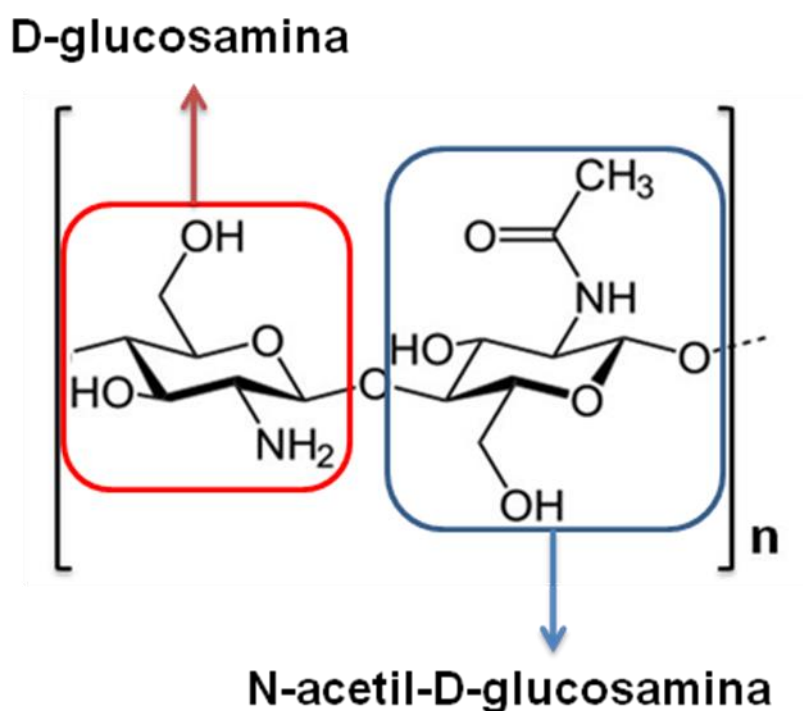


Figura 3: Estrutura química da quitosana.

Fonte: Adaptado de Avcu et al., (2019).

De acordo com Rinaudo (2006), a solubilidade da quitosana depende de alguns fatores como seu grau de desacetilação médio, a distribuição dos grupos acetil na cadeia polimérica principal e seu peso molecular. Devido à estrutura semicristalina que a quitosana apresenta em seu estado sólido, o que pode favorecer interações na forma de ligações de hidrogênio dentro da cadeia polimérica devido a presença de grupos hidroxila, a protonação de seus grupos amina e, conseqüentemente, sua solubilidade (grau de ionização) também será dependente dos valores de pH e pKa do ácido utilizado no processo de solubilização. Geralmente a solubilidade da quitosana é testada em soluções aquosas de ácido acético (1 % ou 0,1 M), dessa forma, dependendo da quantidade de quitosana que será dissolvida, uma quantidade equivalente de

ácido deve ser utilizada, pois a concentração necessária de íons hidrogênio ($n[H^+]$) presente na solução deve ser no mínimo igual à quantidade de grupos amina ($n[-NH_2]$) presentes na cadeia polimérica, já que a fração de grupos carregados positivamente ($n[-NH_3^+]$) na cadeia polimérica da quitosana é uma função do seu grau de dissociação e, conseqüentemente, solubilização (SIMCHI; PISHBIN; BOCCACCINI, 2009).

Na forma de um polieletrólito catiônico a quitosana pode ser atraída para o eletrodo com carga negativa quando um potencial elétrico for aplicado (eletroforese). A literatura relata a ocorrência de reações eletroquímicas de decomposição da água na superfície do cátodo (Equações 4 e 5), a decomposição descrita na Equação 4 ocorre em $E^\circ = -0,83$ V, que geram íons hidroxila (OH^-) e, conseqüentemente, aumentam o valor de pH próximo à superfície do eletrodo. Outras reações eletroquímicas como, por exemplo, a redução de hidrogênio em meio ácido, podem acontecer paralelamente às reações de redução da água, no entanto, não interferem diretamente no mecanismo de deposição eletroforética da quitosana (BOCCACCINI et al., 2010; CHANG; GOLDSBY, 2013; AVCU et al., 2019).



Portanto, a deposição da quitosana pode ser realizada utilizando a técnica de deposição eletroforética por um mecanismo de neutralização catódica descrito na literatura (BOCCACCINI et al., 2010; AVCU et al., 2019). Esse mecanismo baseia-se na movimentação eletroforética das macromoléculas de quitosana carregadas positivamente na direção do cátodo. Quando atingem a região de elevado pH na superfície do cátodo, ocorre a neutralização dos grupos amina carregados positivamente da quitosana ($-NH_3^+$) pelos íons hidroxila (OH^-) gerados pelas reações de decomposição da água (Equações 4 e 5). Dessa forma, a quitosana torna-se insolúvel e deposita-se na forma de filme sobre a superfície do eletrodo formando interações de adsorção. A transição entre as formas solúvel e insolúvel das macromoléculas de quitosana

ocorre em torno de valores de pH entre 6 e 6,5, sendo totalmente insolúvel em pH 6,6 em soluções aquosas ácidas diluídas, ou seja, próximo ao seu valor de pKa. Dessa forma, nota-se a forte influência que o grau de N-acetilação tem sobre o valor de pKa e, conseqüentemente, sobre a solubilidade da quitosana, pois espera-se que quanto maior for o grau de desacetilação maior será a solubilidade da quitosana. A Equação 6 apresenta uma reação simplificada do mecanismo de deposição (ZARGAR et al., 2015; AVCU et al., 2019).



A adsorção das macromoléculas de quitosana à superfície do aço pode acontecer por processos de fisissorção (interações eletrostáticas) e/ou quimissorção (transferência de carga). Como as moléculas de quitosana podem existir nas formas protonadas e neutras em soluções ácidas, a adsorção pode ocorrer por atração eletrostática entre as moléculas carregadas positivamente e a superfície do metal carregado negativamente. Além disso, no processo de adsorção por quimissorção os heteroátomos de nitrogênio e oxigênio presentes na cadeia polimérica da quitosana neutra podem doar seus pares de elétrons livres para os orbitais d vazios do metal (ASHASSI-SORKHABI; KAZEMPOUR, 2020). Dessa forma, devido à neutralização das moléculas de quitosana carregadas positivamente que acontece na superfície do cátodo (Equação 6), pode-se concluir que a formação de depósitos de quitosana por EPD acontece principalmente por processos de quimissorção.

A codeposição de quitosana com partículas inorgânicas ou com outras moléculas orgânicas é possível graças à capacidade que as macromoléculas de quitosana protonadas possuem para adsorver na superfície de partículas dispersas na suspensão e transmitir para elas carga positiva favorecendo sua movimentação em direção ao cátodo. Além disso, interações intermoleculares com moléculas orgânicas também são possíveis graças à presença dos grupos amina e hidroxila capazes de formar ligações de hidrogênio. Outra possibilidade de interação descrita na literatura é a formação de complexos entre a quitosana e íons metálicos devido à capacidade de quelação também atribuída aos grupos amina e hidroxila presentes na cadeia polimérica,

principalmente na região de elevado pH na superfície do cátodo onde os grupos amina perdem sua carga positiva. Também é possível a formação de interações eletrostáticas como as forças fracas de Van der Waals entre a quitosana e nanopartículas com carga negativa presentes no eletrólito (RINAUDO, 2006; ZHITOMIRSKY; HASHAMBHOY, 2007; HASSAN; SUZUKI; EL-MONEIM, 2014).

De acordo com Avcu et al., (2019), o primeiro registro sobre a obtenção de revestimentos de quitosana por deposição eletroforética foi feito pelo grupo de pesquisa liderado por Gregory F. Payne no ano de 2002 ao propor a deposição da quitosana, carregada positivamente em soluções levemente ácidas, sobre o cátodo por meio da aplicação de um potencial elétrico. Já em 2005 o mesmo grupo de pesquisa demonstrou a possibilidade de mediar à eletrodeposição de nanopartículas inorgânicas utilizando a quitosana em um processo de codeposição. Ainda no mesmo ano os pesquisadores Xin Pang e Igor Zhitomirsky conseguiram depositar filmes compósitos de quitosana/hidroxiapatita (hidroxiapatita – HA: são cristais de fosfato de cálcio presentes no tecido ósseo) por deposição eletroforética pela primeira vez. Em 2007 eles conseguiram demonstrar o mecanismo de codeposição de nanopartículas de HA com quitosana via EPD. Outros estudos foram conduzidos nos anos seguintes pelos grupos de pesquisa liderados por Igor Zhitomirsky e Aldo R. Boccaccini, principalmente referentes à deposição de materiais compósitos à base de quitosana aplicados no setor biomédico devido às suas propriedades biocompatíveis aliada à sua excelente capacidade de formação de filme.

Apesar de ser uma linha de pesquisa relativamente nova, existe na literatura uma extensa quantidade de trabalhos referentes a pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de materiais compósitos à base de quitosana obtidos por deposição eletroforética. A Figura 4 mostra a evolução no número de artigos publicados até 2019 sobre revestimentos de quitosana obtidos por deposição eletroforética. A pesquisa foi realizada nas bases de dados da Scopus® e Web of Science - Coleção Principal (Clarivate Analytics), os resultados mostraram um número equivalente de publicações relacionadas ao tema nas duas bases de divulgação científica. Esses dados comprovam o

interesse da comunidade científica e a importância dessa linha de pesquisa para o desenvolvimento de novas tecnologias tendo em vista o número crescente de artigos publicados ao longo dos anos (AVCU et al., 2019).

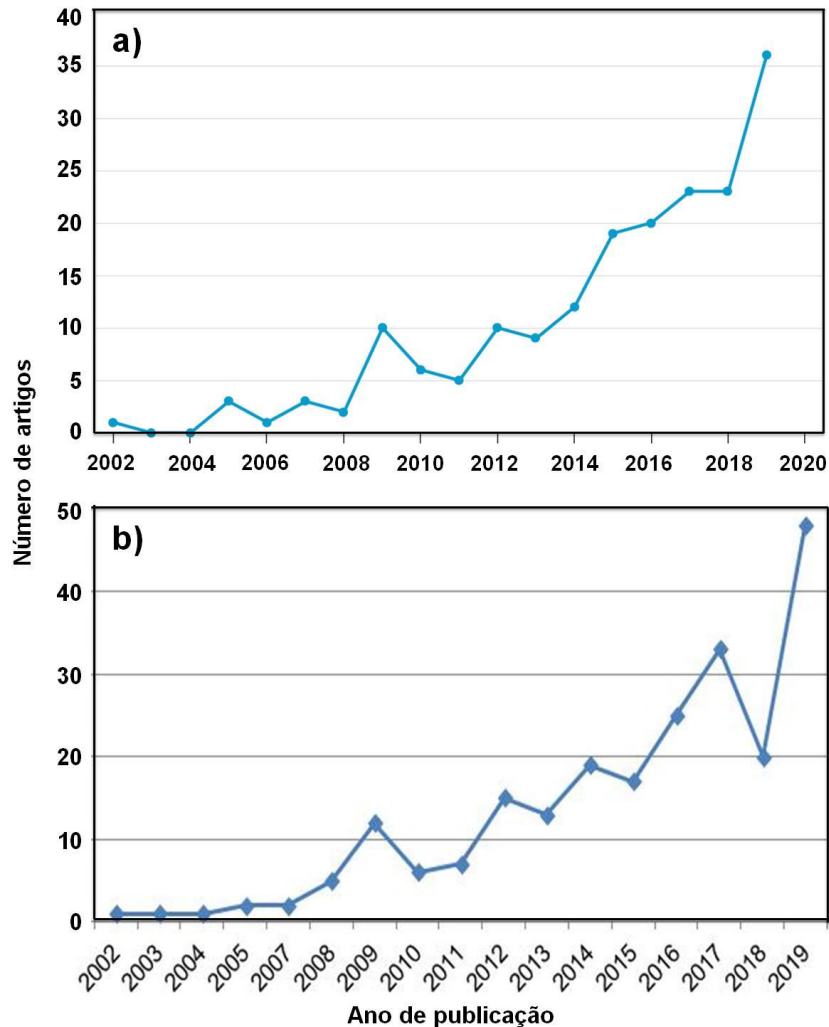


Figura 4: número de artigos publicados até 2019 de acordo com pesquisa realizada nos bancos de dados: (a) Scopus® e (b) Web of Science - Coleção Principal (Clarivate Analytics), usando as palavras-chave: “Electrophoretic deposition” and “Chitosan” como termos de busca.

Fonte: Scopus® (Elsevier) (2020); Web of Science - Coleção Principal (Clarivate Analytics) (2020).

Entre os trabalhos disponíveis na literatura sobre revestimentos de quitosana obtidos por deposição eletroforética, alguns podem ser destacados como exemplos de estudos que contribuíram para o desenvolvimento dessa linha de pesquisa. Alguns trabalhos avaliaram o efeito dos parâmetros de deposição (potencial elétrico e pH da suspensão eletrolítica), sobre as

propriedades de filmes de quitosana pura obtidos por deposição eletroforética com o intuito de verificar a possibilidade de obtenção de revestimentos funcionais aplicados no setor biomédico. Os resultados desses estudos mostraram a eficiência da técnica de EPD utilizada para modificar a superfície de implantes metálicos, com revestimentos bioativos à base de quitosana, por meio do controle adequado dos parâmetros de deposição (WU et al., 2002; SIMCHI et al., 2009; GEBHARDT et al., 2012).

Devido ao fato da quitosana possuir uma solubilidade dependente do pH, aliado à possibilidade de funcionalização da cadeia polimérica e de sua excelente capacidade de formação de filme, a sua utilização para produção de dispositivos com funcionalidade biológica (biofabricação) começou a ganhar destaque na comunidade científica (YI et al., 2005). Como exemplo, pode ser citado o estudo que utilizou a quitosana como matriz polimérica para biofabricação do compósito quitosana-hemoglobina por eletrodeposição em uma única etapa, aplicado como biossensor (LI et al., 2011).

Além dos filmes de quitosana pura ou na forma de compósitos com outras moléculas orgânicas, pesquisas sobre a possibilidade de produção de nanocompósitos contendo nanopartículas inorgânicas em uma matriz polieletrólítica (nanocompósitos orgânico-inorgânico) começaram a ganhar destaque devido à necessidade de ampliar as aplicações dos filmes compósitos à base de quitosana (ZHITOMIRSKY, 2006; ZHITOMIRSKY; HASHAMBHOY, 2007). Como exemplo desse tipo de estudo, podem ser citados os trabalhos iniciais para produção de revestimentos compósitos de quitosana/hidroxiapatita devido às suas propriedades de resistência à corrosão em meio fisiológico simulado aliado à sua elevada biocompatibilidade (REDEPENNING et al., 2003; PANG; ZHITOMIRSKY, 2007).

Além dos revestimentos de quitosana contendo hidroxiapatita, outros materiais funcionais como, por exemplo, derivados do carbono (nanotubos de carbono, grafeno, óxido de grafeno), biovidro, nanopartículas de metais, fármacos, entre outros, têm sido adicionados à matriz de quitosana para produção de revestimentos com propriedades físicas e químicas superiores para diversas aplicações em catálise e biomedicina (CASAGRANDE et al.,

2008; LI; WU; ZHITOMIRSKY, 2010; XU; DAI; CHEN, 2010; PISHBIN et al., 2014; SHI et al., 2016).

Mais recentemente uma metodologia inovadora para produção de filmes de quitosana baseado no processo de coordenação com íons metálicos gerados in-situ por oxidação eletroquímica foi proposta (GENG et al., 2016). O método permitiu a produção de filmes na forma de hidrogéis de quitosana transparentes e homogêneos que podem ser facilmente retirados da superfície do eletrodo. Os autores destacaram a possibilidade de produção de filmes com diferentes formatos, além da capacidade de codepositar nanopartículas funcionais simultaneamente com o hidrogel de quitosana na forma de um complexo sobre a superfície de eletrodos utilizados para produção de dispositivos biomédicos como, por exemplo, biossensores.

Nota-se que, devido à sua biocompatibilidade, os revestimentos à base de quitosana são principalmente aplicados no setor biomédico. Referente a esse tipo de aplicação, a literatura dispõe de relevantes revisões bibliográficas sobre materiais compósitos à base de quitosana, com destaque para as revisões publicadas por Boccaccini et al., (2010) e Avcu et al., (2019), que mostram um panorama geral dos principais trabalhos publicados na área, além de indicar futuras perspectivas de estudos voltados para aplicações em biomedicina. Ashassi-Sorkhabi e Kazempour (2020) publicaram uma revisão sobre a utilização da quitosana e seus compósitos para proteção de estruturas metálicas produzidas a partir de ligas à base de aço contra corrosão. Recentemente nosso grupo de pesquisa também desenvolveu um estudo sobre a possibilidade de aplicação de um novo revestimento compósito de quitosana-tungstênio aplicado contra corrosão metálica (OLIVEIRA et al., 2020). Dessa forma, nota-se que devido à sua excelente capacidade de formação de filme, revestimentos de quitosana também podem ser aplicados em outros setores tecnológicos.

4 Conclusão

Portanto, devido às propriedades da quitosana, que permitem sua aplicação em diferentes setores tecnológicos, nota-se a importância do estudo

e desenvolvimento de novos revestimentos compósitos à base de quitosana obtidos pela técnica de deposição eletroforética. Além disso, futuras pesquisas devem focar na otimização dos parâmetros envolvidos no processo de deposição com o intuito de obter materiais ou revestimentos com propriedades mecânicas, microestruturais e biológicas específicas para aplicações avançadas no setor industrial, tecnológico e biomédico.

5 Referências

ASHASSI-SORKHABI, H.; KAZEMPOUR, A. *Chitosan, its derivatives and composites with superior potentials for the corrosion protection of steel alloys: A comprehensive review*. **Carbohydrate Polymers**, v. 237, p. 116110, 2020.

AVCU, E.; BAŞTAN, F. E.; ABDULLAH, H. Z.; REHMAN, M. A. U.; AVCU, Y. Y.; BOCCACCINI, A. R. *Electrophoretic deposition of chitosan-based composite coatings for biomedical applications: A review*. **Progress in Materials Science**, v. 103, p. 69–108, 2019.

BAKHSHANDEH, S.; AMIN YAVARI, S. *Electrophoretic deposition: A versatile tool against biomaterial associated infections*. **Journal of Materials Chemistry B**, v. 6, n. 8, p. 1128–1148, 2018.

BESRA, L.; LIU, M. *A review on fundamentals and applications of electrophoretic deposition (EPD)*. **Progress in Materials Science**, v. 52, p. 1–61, 2007.

BOCCACCINI, A. R. *Electrophoretic deposition: Fundamentals and applications in materials science*. **Journal of Materials Science**, v. 41, p. 8029–8030, 2006.

BOCCACCINI, A. R.; KEIM, S.; MA, R.; LI, Y.; ZHITOMIRSKY, I. *Electrophoretic deposition of biomaterials*. **Journal of the Royal Society Interface**, v. 7, p. S581–S613, 2010.

CASAGRANDE, T.; LAWSON, G.; LI, H.; WEI, J.; ADRONOV, A.; ZHITOMIRSKY, I. *Electrodeposition of composite materials containing functionalized carbon nanotubes*. **Materials Chemistry and Physics**, v. 111, n. 1, p. 42–49, 2008.

CHANG, R.; GOLDSBY, K. A. **Química**. 11 ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

CHEKIN, F.; RAOOF, J. B.; BAGHERI, S.; ABD HAMID, S. B. The porous chitosan–sodium dodecyl sulfate–carbon nanotube nanocomposite: direct electrochemistry and electrocatalysis of hemoglobin. **Analytical Methods**, v. 4, p. 2977-2981, 2012.

CHENG, Y.; GRAY, K. M.; DAVID, L.; ROYAUD, I.; PAYNE, G. F.; RUBLOFF, G. W. Characterization of the cathodic electrodeposition of semicrystalline chitosan hydrogel. **Materials Letters**, v. 87, p. 97-100, 2012.

CLAVIJO, S.; MEMBRIVES, F.; QUIROGA, G.; BOCCACCINI, A. R.; SANTILLÁN, M. J. Electrophoretic deposition of chitosan/Bioglasss® and chitosan/Bioglasss®/TiO₂ composite coatings for bioimplants. **Ceramics International**, v. 42, p. 14206-14213, 2016.

CLIFFORD, A.; PANG, X.; ZHITOMIRSKY, I. Biomimetically modified chitosan for electrophoretic deposition of composites. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 544, p. 28-34, 2018.

DIBA, M.; FAM, D. W. H.; BOCCACCINI, A. R.; SHAFFER, M. S. P. Electrophoretic deposition of graphene-related materials: A review of the fundamentals. **Progress in Materials Science**, v. 82, p. 83–117, 2016.

EL-HADDAD, M. N. Chitosan as a green inhibitor for copper corrosion in acidic médium. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 55, p. 142-149, 2013.

GEBHARDT, F.; SEUSS, S.; TURHAN, M. C.; HORNBERGER, H.; VIRTANEN, S.; BOCCACCINI, A. R. Characterization of electrophoretic chitosan coatings on stainless steel. **Materials Letters**, v. 66, n. 1, p. 302–304, 2012.

GENG, Z.; WANG, X.; GUO, X.; ZHANG, Z.; CHEN, Y.; WANG, Y. Electrodeposition of chitosan based on coordination with metal ions in situ-generated by electrochemical oxidation. **Journal of Materials Chemistry B**, v. 4, n. 19, p. 3331–3338, 2016.

HAMAKER, H. C. Formation of a deposit by electrophoresis. **Transactions of the Faraday Society**, v. 35, p. 279–87, 1940.

HASSAN, S.; SUZUKI, M.; EL-MONEIM, A. A. Synthesis of MnO₂-chitosan nanocomposite by one-step electrodeposition for electrochemical energy storage application. **Journal of Power Sources**, v. 246, p. 68–73, 2014.

KHALILI, M.; ABEDI, M.; AMOLI, H. S.; MOZAFFARI, S. A. Comparison of chitosan and chitosan nanoparticles on the performance and charge recombination of water-based gel electrolyte in dye sensitized solar cells. **Carbohydrate Polymers**, v. 175, p. 1-6, 2017.

LI, Y.; PANG, X.; EPAND, R. F.; ZHITOMIRSKY, I. Electrodeposition of chitosan-hemoglobin films. **Materials Letters**, v. 65, n. 10, p. 1463–1465, 2011.

LI, Y.; WU, K.; ZHITOMIRSKY, I. Electrodeposition of composite zinc oxide-chitosan films. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 356, p. 63–70, 2010.

OLIVEIRA, J. A. M.; de SANTANA, R. A. C.; WANDERLEY NETO, A de O. Characterization of the chitosan-tungsten composite coating obtained by electrophoretic deposition, **Progress in Organic Coatings**, v. 146, p. 105631, 2020.

PANG, X.; ZHITOMIRSKY, I. Electrophoretic deposition of composite hydroxyapatite-chitosan coatings. **Materials Characterization**, v. 58, n. 4, p. 339–348, 2007.

PISHBIN, F.; MOURIÑO, V.; FLOR, S.; KREPEL, S.; SALIH, V.; RYAN, M. P.; BOCCACCINI, A. R. Electrophoretic deposition of gentamicin-loaded bioactive glass/chitosan composite coatings for orthopaedic implants. **ACS Applied Materials and Interfaces**, v. 6, n. 11, p. 8796–8806, 2014.

REDEPENNING, J.; VENKATARAMAN, G.; CHEN, J.; STAFFORD, N. Electrochemical preparation of chitosan/hydroxyapatite composite coatings on titanium substrates. **Journal of Biomedical Materials Research**, v. 66A, n. 2, p. 411–416, 2003.

RINAUDO, M. Chitin and chitosan: Properties and applications. **Progress in Polymer Science (Oxford)**, v. 31, n. 7, p. 603–632, 2006.

SARKAR, P.; NICHOLSON, P. S. *Electrophoretic deposition (EPD): mechanisms, kinetics, and application to ceramics*. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 79, p. 1987–2002, 1996. Scopus (Elsevier). Disponível em: <<https://www-scopus-com.ez18.periodicos.capes.gov.br/search/form.uri?display=basic&zone=header&origin=resultlist>>. Acesso em: 20 Jun. 2020.

SHI, Y. Y.; LI, M.; LIU, Q.; JIA, Z. J.; XU, X. C.; CHENG, Y.; ZHENG, Y. F. *Electrophoretic deposition of graphene oxide reinforced chitosan–hydroxyapatite nanocomposite coatings on Ti substrate*. **Journal of Materials Science: Materials in Medicine**, v. 27, n. 3, p. 1–13, 2016.

SIMCHI, A.; PISHBIN, F.; BOCCACCINI, A. R. *Electrophoretic deposition of chitosan*. **Materials Letters**, v. 63, n. 26, p. 2253–2256, 2009.

SORKHI, L.; FARROKHI-RAD, M.; SHAHRABI, T. *Electrophoretic deposition of chitosan in different alcohols*. **Journal of Coatings Technology and Research**, v. 11, p. 739-746, 2014.

Web of Science - Coleção Principal (Clarivate Analytics). Disponível em: <http://apps-webofknowledge.ez18.periodicos.capes.gov.br/WOS_AdvancedSearch_input.do?SID=8Ane9M9qtlTmisIC8CQ&product=WOS&search_mode=AdvancedSearch> Acesso em: 23 Out. 2020.

WU, L. Q.; GADRE, A. P.; YI, H.; KASTANTIN, M. J.; RUBLOFF, G. W.; BENTLEY, W. E.; PAYNE, G. F.; GHODSSI, R. *Voltage-dependent assembly of the polysaccharide chitosan onto an electrode surface*. **Langmuir**, v. 18, n. 22, p. 8620–8625, 2002.

XU, H.; DAI, H.; CHEN, G. *Direct electrochemistry and electrocatalysis of hemoglobin protein entrapped in graphene and chitosan composite film*. **Talanta**, v. 81, p. 334–338, 2010.

YANAN, Z.; HONGYU, L.; ZIJIAN, W.; QIANG, Z.; YINPING, L.; WEIQUN, T. T.; YINGYING, W.; CÉLINE, H.; XIAOWEN, S.; YUN, C. *Electrodeposition to construct mechanically robust chitosan-based multi-channel conduits*. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 163, p. 412-418, 2018.

YI, H.; WU, L. Q.; BENTLEY, W. E.; GHODSSI, R.; RUBLOFF, G. W.; CULVER, J. N.; PAYNE, G. F. *Biofabrication with chitosan*. **Biomacromolecules**, v. 6, n. 6, p. 2881–2894, 2005.

ZARGAR, V.; ASGHARI, M.; DASHTI, A. *A Review on Chitin and Chitosan Polymers: Structure, Chemistry, Solubility, Derivatives, and Applications*. **ChemBioEng Reviews**, v. 2, n. 3, p. 204–226, 2015.

ZHITOMIRSKY, I. *Electrophoretic deposition of organic-inorganic nanocomposites*. **Journal of Materials Science**, v. 41, n. 24, p. 8186–8195, 2006.

ZHITOMIRSKY, I.; HASHAMBHOY, A. *Chitosan-mediated electrosynthesis of organic-inorganic nanocomposites*. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 191, p. 68–72, 2007.

6 Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.