DEPOSIÇÃO ELECTROQUÍMICA

FRANCISCO PAULA

URFIC-Indústria de Ferragens, S.A.
Rua Eduardo António Coimbra, 319, 3460-591 TONDELA
fpaula00@hotmail.com

ABSTRACT: We describe the overall process of electrochemical deposition (ECD), introducing the relevant physical and chemical phenomena and their fundamental models that enable us to relate quantitatively the main variables, making a synthesis that will serve as a starting point for future developments and enable from a practical point of view, a more effective control of this important industrial process.

Keywords: Physical Chemistry, Electrochemistry, Surface Treatment, Plating, Corrosion Protection, Coatings.

RESUMO: Descrevemos globalmente o processo da deposição electroquímica (ECD), apresentando os fenómenos químicos e físicos relevantes e os seus modelos explicativos fundamentais que permitem relacionar quantitativamente as principais variaveis, fazendo uma síntese que sirva de ponto de partida a futuros desenvolvimentos e possibilite do ponto de vista prático um mais eficaz controle deste importante processo industrial.

Palavras Chave: Química Física, Electroquímica, Tratamento de superfície, Electrodeposição, Protecção anticorrosiva, Revestimentos.

1. INTRODUÇÃO

A deposição electroquímica é um processo químico heterogéneo controlado que deposita substâncias numa superfície, revestindo-a. É um fenómeno associado à separação de cargas eléctricas em soluções de electrólitos, logo é um fenómeno electroquímico.

Estes processos são extensivamente utilizados no revestimento de produtos metálicos fabricados em Portugal, não existindo contudo escrito em Português uma sintese das ferramentas básicas teóricas que suportam esta tecnologia. Este texto é um primeiro passo nesse sentido.

O procedimento electroquímico de produzir revestimentos a partir dum electrólito aquoso é realizado em numerosos casos à temperatura ambiente e à pressão atmosférica o que o torna particularmente atractivo para aplicações industriais, nas quais tem uma larga gama de utilizações: na protecção anticorrosiva; na decoração, no aumento da resistência mecânica e no aumento da resistência à abrasão de diversos materiais, sendo empregue na industria automovel, aeroespacial, militar, electrónica, ferragens, etc.

Os depósitos mais frequentes são: metais puros, ligas metálicas, óxidos e polímeros.

2. DEPOSIÇÃO DE METAIS PUROS E LIGAS METÁLICAS

A principal reacção da deposição electroquímica de metais M e ligas metálicas sobre um substracto, o eléctrodo, envolve a redução dos iões do metal M^{n+} presentes em solução, o electrólito, que se representa pela seguinte reacção parcial:

$$M^{n+}(aq) + ne^- \leftrightarrow M(s)$$

ocorrendo na superfície catalítica do eléctrodo, sendo uma reacção de troca de particulas nesse interface de contacto entre o eléctrodo e o electrólito.

Este processo pode ser realizado de duas maneiras distintas:

1.º ELECTRODEPOSIÇÃO

Onde os n electrões (e^-) são fornecidos ao eléctrodo, por uma fonte de energia eléctrica externa que lhes aplica uma sobretensão η.

2.º ELECTROLESS

Não há fornecimento exterior de energia eléctrica, a fonte de electrões é um agente redutor presente na superfície catalítica do eléctrodo.

2.1. Processo da Deposição

O processo total de deposição envolve uma multiplicidade de fenómenos físicos e químicos que o tornam complexo mas que podemos agrupar em quatro tipos fundamentais:

1.º TRANSFERÊNCIA DE CARGA

Transferência dos portadores de carga: electões, iões ou moléculas pelo interface entre o eléctrodo e o electrólito.

2.º TRANSPORTE DE MASSA

Transporte das espécies químicas intervenientes, do interior da solução, para a superfície do eléctrodo.

3.º REACÇÕES QUÍMICAS

Diversas homogéneas na solução do electrólito e heterogéneas à superfície do eléctrodo.

4.º CRISTALIZAÇÃO

Processos metal, ião metálico, incorporação ou remoção de átomos metálicos no reticulo cristalino à superfície do eléctrodo.

O fenómeno mais lento determina a velocidade global do processo.

3. TRANSFERÊNCIA DE CARGA

É a reacção de oxidação-redução onde ocorre a reacção principal, a semi-reacção de redução do ião metálico a metal sólido.

$M^{n+}(aq) + ne^- \leftrightarrow M(s)$ redução

$RED \leftrightarrow ne^- + OX^{n+}$ oxidação

$M^{n+}(aq) + RED \leftrightarrow M(s) + OX^{n+}$

Esta reacção ocorre, no interface entre o eléctrodo e o eletrólito, entre o eléctrodo e um ião ou molécula, as variaveis envolvidas no estudo deste sistema são: a **diferença de potencial** ε, entre os polos dos eléctrodos da célula electrolítica, a **intensidade de corrente I** que circula entre os polos dos eléctrodos e o **intervalo de tempo Δ t** em que decorre a reacção.

Quando experimentalmente se monta o sistema, se colocam eléctrodos e reagentes em contacto e se permite a transferência de carga, fechando o circuito entre os eléctrodos por exemplo, o sistema desloca-se naturalmente no sentido de se estabelecer o equilíbrio químico.

Nestas condições a velocidade v de cada semi-reacção é:

$$v = k[OX^{n+}] = k[RED], \quad k = \frac{kT}{h} e^{\left(\frac{-E^a}{RT}\right)}$$

sendo: E^a a energia de activação, *k* a constante de Boltzman, h a constante de Planck, R a constante dos gases perfeitos e T a temperatura absoluta.

A constante de velocidade k não mede a velocidade de transferência do electrão já que esse processo adiabático segue o princípio de Franck-Condon ocorrendo aproximadamente em 10^{-16}s, o que ela efectivamente mede é o tempo necessário para que as espécies, tendo alcançado a região interfacial se rearrangem e ás suas atmosferas iónicas numa posição que permita a ocorrência da tranferência do electrão.

A velocidade da semi-reacção relaciona-se com a densidade de corrente i, da seguinte forma:

$i = nFv$

Sendo F a constante de Faraday, se A for a área activa do eléctrodo, a intensidade de corrente I = iA logo:

$I = nFvA$

O potencial de eléctrodo padrão E° relaciona-se com a variação de energia livre de Gibbs padrão ΔG°, da seguinte forma:

$\Delta G^\circ = -nF\varepsilon^\circ$

Em condições padrão todas as espécies estão a 25ºC, os gases à pressão de 1 bar e os iões com actividade 1 M, nestas condições se o sistema tiver dois eléctrodos metálicos a d.d.p. ε°, entre eles é dada por:

$\varepsilon^\circ = E^\circ(M^{n+}, M) - E^\circ(OX^{n+}, RED)$

Em condições não padrão a d.d.p. ε da célula pode ser calculada pela equação de Nernst:

$$\varepsilon = \varepsilon^\circ - \frac{RT}{nF} \; In \; \frac{\alpha_M \cdot \alpha_{ox^{n+}}}{\alpha_{M^{n+}} \cdot \alpha_{RED}}$$

sendo α a actividade de cada espécie reaccional.

O estudo da termodinâmica de equilibrio deste sistema fornece um critério para a sua ocorrência espontanea que é: o potencial de eléctrodo da redução ser superior ao da oxidação:

$E(M^{n+},M) > E(OX^{n+}, RED)$

de modo que o agente redutor funcione como um dador de electrões e o ião metálico como um aceitador de electrões, nas condições padrão:

$E^\circ(M^{n+},M) > E^\circ(OX^{n+}, RED)$

3.1. Tempo de Reacção

Quando se monta este sistema electroquímico, depois de colocados os reagentes e eléctrodos em contacto a reacção electroquímica ocorre até alcançar o equilibrio químico, podendo contudo ser parada, retirando o eléctrodo ou interrompendo caso exista circuito externo de corrente, desta forma podemos controlar o grau de avanço da reacção e a quantidade de depósito a formar:

1.º Interrompendo a circulação de electrões, interrompendo o circuito exterior de corrente.
2.º Interrompendo a circulação de iões, retirando se houver a ponte salina.
3.º Interrompendo o contacto entre reagentes e ou catalizadores, retirando os eléctrodos.

3.2. Interface Eléctrodo-Electrólito

É no interface entre o eléctrodo e o electrólito que se dá a reacção de transferência de carga.

O interface é a região próxima de contacto das duas fases entre o elétrodo (sólido) e o electrólito (líquido), cuja composição é diferente da composição no interior de cada uma das fases isoladamente.



Fig. 1. Esquema da região interface de contacto entre o eléctrodo e o electrólito.

A maneira como as diversas espécies químicas se orientam e posicionam e movimentam na região do interface entre o eléctrodo e o electrólito constitui a sua estrutura.

O processo de deposição ocorre nesta região muito fina onde existe um campo eléctrico local muito forte quando aplicado por uma fonte de energia exterior, mais fraco quando resulta da separação local de cargas. O valor do potencial electrostático φ é diferente do do interior da solução.

A velocidade do processo de deposição depende da estrutura do interface eléctrodo-electrólito mais precisamente da estrutura da região da camada electrolítica já que a função do eléctrodo é apenas fornecer ou retirar electrões da região de interface.

Quando o eléctrodo adquire excesso de electrões fica com carga negativa quando perde muitos electrões fica com carga positiva, em função disto as espécies moveis na região da camada electrolítica rearranjam-se de modo a manter a neutralidade do sistema:

$q_{eléctrodo}=-q_{solução}$

A maneira como estas cargas se distribuem na região da camada electrolítica é explicada por vários modelos de distribuição de carga predominantemente de origem electrostática.

3.2.1. Modelo da Região da camada Electrolítica

O modelo mais simples é equiparar a distribuição de cargas na região da camada electrolítica à distribuição de cargas num condensador de pratos paralelos.

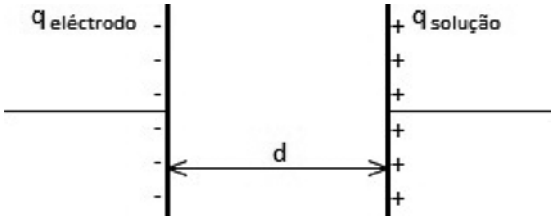


Fig. 2. Distribuição de cargas num condensador de pratos paralelos.

A constante de proporcionalidade entre o potencial aplicado e a carga devida à distribuição de carga é a capacidade C da dupla camada.

A capacidade do condensador de pratos paralelos por unidade de área é dada por:

$$C = \frac{\epsilon}{4\pi d}$$

onde ϵ é a constante dieléctrica do material entre os pratos e d é a distância entre eles. É neste caso independente da d.d.p. aplicada aos pratos do condensador.

É possível medir a capacidade experimentalmente C_e da dupla camada electrolítica que varia com a d.d.p. Δφ entre a solução e o eléctrodo e desta forma comparar as capacidades calculadas pelos diversos modelos com os valores experimentais.

Um modelo mais sofisticado, com melhor correspondência experimental, baseia-se na definição de três camadas sendo cada uma delas equivalente a um condensador plano:

1.ª de espessura d_1 entre a superfície do eléctrodo e o plano interior de Helmholtz (IHP) que é o plano que passa pelo centro dos iões adsorvidos parcial ou completamente desidratados logo d_1 é o seu raio iónico.

$$C = \frac{\epsilon}{4\pi d_1}$$

2.ª de espessura d_2 entre a superfície do eléctrodo e o (OHP), o plano exterior de Helmholtz que passa pelo centro dos iões completamente hidratados logo d_2 é o ráio dos iões hidratados ~3-4 Å.

$$C = \frac{\epsilon}{4\pi d_2}$$

3.ª de espessura d_d é a camada de difusão de Gouy-Chapman dada por:

$$\Delta\varphi = e^{(-cd_d)}$$

varia com a d.d.p. Δφ entre o eléctrodo e a solução, é uma constante caracteristica da solução, n_j é o número de iões j no interior da solução e a capacidade da camada de difusão C_d é:

$$C_d = \left(\frac{2n^2e^2\epsilon n_j}{4\pi KT}\right)^{1/2} \cosh\left(\frac{ne\Delta\varphi}{2KT}\right)$$

A capacidade teórica C_T da região da camada electrolítica é a capacidade equivalente resultante da associação de três condensadores correspondentes respectivamente ás três camadas:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_d}$$

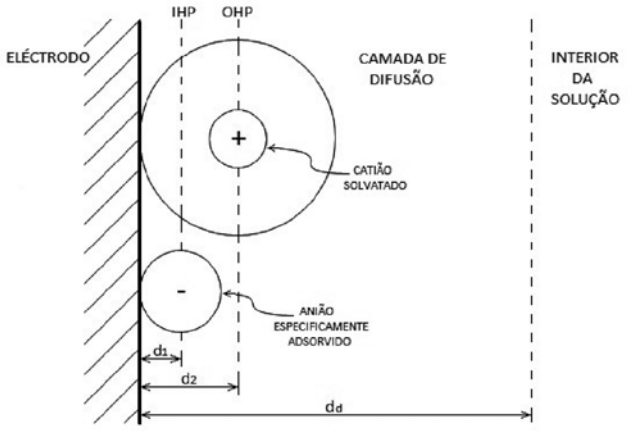


Fig. 3. Distribuição de cargas na região da camada electrolítica pelo modelo da tripla camada.

4. TRANSPORTE DE MASSA

É o transporte dos reagentes e produtos formados durante a reacção do eléctrodo entre o interface dupla camada e a restante solução.

Quando este processo é o mais lento, ele é o determinante da velocidade do processo geral de deposição que se diz, limitado pelo transporte para o eléctrodo.

Neste caso interessa-nos o transporte de particulas carregadas iões por entre sistemas de outras particulas, do electrólito, na direcção perpendicular a superfícies equipotenciais, até encontrarem o eléctrodo.

Este transporte tem lugar por difusão, por migração e por convecção e corresponde ao transporte da espécie activa da solução para o eléctrodo através da camada hidrodinâmica de espessura δ.

Os iões solvatados movem-se com diferentes velocidades de acordo com o seu tamanho e carga e mesmo aumentando a sobretensão η que é a d.d.p. aplicada aos eléctrodos, chega um ponto em que essa velocidade deixa de aumentar, a densidade de corrente mantem-se constante, é a chamada densidade de corrente limitante i_L.

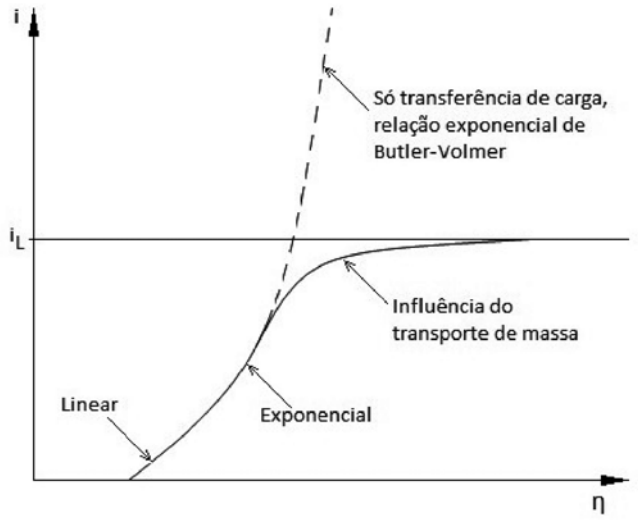


Fig. 4. Relação entre a densidade de corrente i e a sobretensão η.

O transporte da espécie j de concentração c_j é quantificado pelo fuxo de massa $\boldsymbol{J}_j = c_j \boldsymbol{v}_j$, a sua velocidade total absoluta $\mathbf{v}_j$ resulta do efeito combinado da: velocidade de difusão $\boldsymbol{v}_j^D$, velocidade de migração $\boldsymbol{v}_j^M$ e velocidade de convecção $\boldsymbol{v}_j^D$ e logo o fluxo de massa:

$$\boldsymbol{J}_j = \boldsymbol{J}_j^D + \boldsymbol{J}_j^M + \boldsymbol{J}_j^C$$

4.1. Difusão

Movimento das espécies num gradiente de concentração, gradiente causado pela reacção de eléctrodo.

A difusão é devida a um gradiente de concentração, uma alteração local da concentração, é um processo auto conduzido termodinamicamente irreversivel, para um estado de equilibrio de máxima entropia do sistema, por eliminação do gradiente de concentração, ele é descrito pela primeira Lei de Fick:

$$\boldsymbol{J}_j^D = -D_j \Delta c_j$$

Sendo c_j a concentração das especies j em difusão, o seu gradiente actua como uma força condutora dessas particulas, ele refere-se à sua variação da concentração como função da distância. D_j é o coeficiente de difusão e $\boldsymbol{J}_j^D$ é o fluxo de difusão, ou seja a quantidade de espécie j difundida que passa na unidade de tempo numa unidade de área.

Experimentalmente verifica-se que o coeficiente de difusão da espécie j, D_j depende da temperatura de acordo com:

$$D_j = D_j^o \; e^{\left(\frac{-E_j^a}{KT}\right)}$$

Sendo D_j^o o máximo coeficiente de difusão a temperatura infinita que é uma constante típica do sistema e E_j^a a energia de activação do processo de difusão da espécie j.

4.1.1. Modelo da Camada de Difusão de Nernst

Este modelo assume que a concentração c_j da espécie activa j varia linearmente até uma distância δ da superfície do eléctrodo. À distância x=0, junto ao eléctrodo despreza o efeito da região da camada electrólitica.

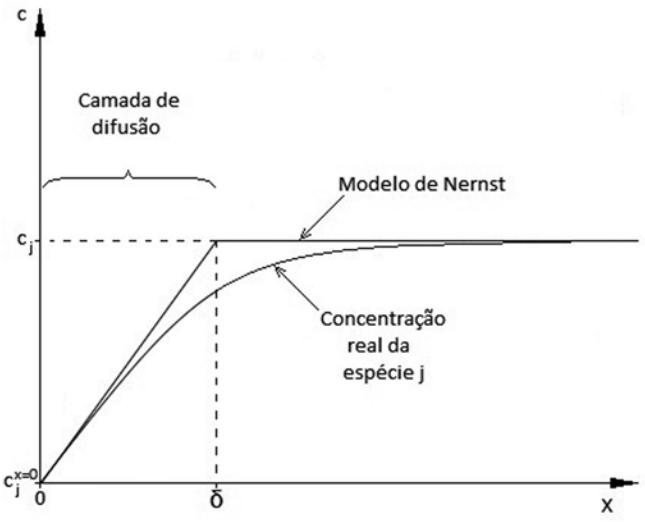


Fig. 5. Ilustração do modelo da camada de difusão δ de Nernst.

Assume também que a camada líquida de espessura δ é perfeitamente estacionária e que a distâncias superiores a δ, a concentração da espécie j é igual à concentração no interior da solução, c_j.

A distâncias x>δ se introduzirmos agitação no electrólito, ele torna-se mais fiel ao modelo de Nernst, à distância δ as especies reagentes difundem-se até alcançarem a superfície do eléctrodo.

De acordo com este modelo o gradiente da concentração à superfície do eléctrodo é:

$$\left(\frac{\partial c_j}{\partial x}\right)_{x=0} \sim \frac{C_j - C_j^{x=0}}{\delta}$$

e a densidade de corrente limitante, i_L:

$$i_L = \frac{nFD_jC_j}{\delta}$$

Aqui difusão refere-se ao movimento de iões e/ou especies neutras, pelo banho de deposição, resultante do movimento molecular aleatório (Browniano) que distribui mais uniformemente as várias espécies componentes do banho em situação de diferenças de concentração locais. Por isso o desaparecimento de iões que se depositam no eléctrodo resulta em movimento destas espécies do interior do banho para a superfície do eléctrodo. A região junto ao eléctrodo onde a concentração da espécie difere da solução é referida como camada de difusão, δ neste modelo de Nernst.

É esperado que a agitação baixe δ enquanto a velocidade de difusão aumenta, claro que δ varia de espécie para espécie.

A camada de difusão não se forma imediatamente ligada a corrente leva algum tempo da ordem de alguns segundos, dependendo da agitação, a formar-se. Uma consequência da técnica de deposição por impulsos eléctricos é evitar a formação da camada de difusão.

4.2. Migração

É o movimento de espécies carregadas j devido a um gradiente do potencial eléctrico ϕ:

$$\boldsymbol{J}_j^M = -u_j c_j \Delta\phi$$

Sendo u_j a mobilidade da espécie carregada j, no electrólito onde é aplicado um campo eléctrico uniforme (igual em todos os pontos do espaço) $\boldsymbol{E}$ que as acelera até uma velocidade de migração constante $\boldsymbol{v}_j^M$:

$$u_j = \boldsymbol{v}_j^M / \boldsymbol{E}$$

pela relação de Einstein: $u_j D_j z_j \left(\frac{F}{RT}\right)$

A migração é devida ao efeito do campo eléctrico criado pela deslocalização das cargas entre os eléctrodos.

Enquanto a difusão ocorre para todas as espécies em solução, a migração afecta só espécies carregadas (efectivamente devido à existência de dipolos ou dipolos induzidos em espécies neutras observa-se um pequeno efeito do campo eléctrico).

Este movimento de iões que origna transporte de massa requer a presença de altas densidades de corrente (~10^4 A/cm^2).

O fluxo de carga resultante da migração da espécie carregada j, num campo eléctrico uniforme e também constante (independente do tempo) $\boldsymbol{E} = -\nabla\phi$ é dado por:

$$\boldsymbol{J}_j^M = D_j z_j c_j \left(\frac{F}{RT}\right)\boldsymbol{E}$$

4.2.1 Condutividade e Mobilidade

A condutividade л da solução do electrólito é o resultado do movimento de todas as espécies j de carga z_j e concentração c_j na solução sob a influência dum campo eléctrico $\boldsymbol{E}$:

$$\Pi = F\sum_j |z_j| c_j u_j$$

4.3. CONVECÇÃO

Movimento de espécies devido a forças mecânicas i.e. escoamento que lhes imprimem a velocidade $\boldsymbol{v}_j^C$.

É o transporte dos reagentes juntamente com o fluxo do liquido em movimento.

Nas condições naturais a convecção surge como resultado do gradiente de densidade da solução que é consequência das variações de concentração na camada superficial, ou se deve ao aquecimento do espaço próximo ao eléctrodo durante a passagem da corrente eléctrica.

A convecção natural pode surgir tambem como resultado do desprendimento de produtos gasosos durante as reacções de eléctrodo.

A convecção artificial cria-se agitando o electrólito ou aquecendo-o.

O fluxo da espécie j, devido à convecção é dado por:

$$\boldsymbol{J}_j^C = \boldsymbol{v}_j^C c_j$$

4.4. Barreiras ao Transporte de Massa

Existem factores retardantes que se opõem à difusão e à migração:

1.º Força de fricção, depende do tamanho do ião solvatado.
2.º Efeito assimétrico devido ao movimento de iões a atmosfera iónica fica distorcida de modo que é comprimida em frente ao ião na direção do seu movimento e estendida atrás dela.
3.º Efeito electroforético no qual o movimento dos iões causa deslocamento das moléculas no solvente associadas aos iões de carga oposta. O resultado é um fluxo líquido de moléculas de solvente na direcção contrária à do ião considerado.

A combinação de todos estes efeitos conduz a uma velocidade máxima de transporte para cada espécie em determinada solução.

As medidas dessas velocidades dão informação sobre a estrutura da solução.

As diferentes velocidades dos catiões e dos aniões originam uma d.d.p. que é o potencial da junção liquida.

5. REACÇÕES QUÍMICAS

Várias reacções químicas podem estar envolvidas no processo global do eléctrodo, podendo ser homogéneas na solução e

heterogéneas à superfície do eléctrodo, originando mecanismos complexos.

Um exemplo é quando os iões do metal a depositar são complexados em solução com um ligante L, neste caso o mecanismo do processo catódico envolve antes da transferência de carga uma reacção de formação da especie M^{n+} por dissociação do respectivo complexo metálico:

$[ML_x]^{n+xp}(aq) \leftrightarrow M^{n+}(aq) + xL^{p}(aq)$

Onde p é o número de oxidação do ligante L.

Outro exemplo é a evolução catódica do hidrogénio em meio ácido que acompanha a electrodeposição de alguns metais como Ni e Cr, no cátodo:

$2H^{+}(aq) + 2e^{-} \rightarrow H_2(g)$

6. CRISTALIZAÇÃO

É o processo de cristalização da substância M, que na forma ionizada em solução, o electrólito, se pretende depositar sobre a superfície do eléctrodo.

A espécie a depositar em solução aquosa encontra-se hidratada sendo, no processo de cristalização, transferida da solução para uma posição preferêncial do reticulo cristalino à superfície do eléctrodo. Este processo pode ser representado por:

$[M(H_2O)_x]^{n+}(aq) \leftrightarrow M^{n+}(\text{preferêncial})$

Esta reacção é acompanhada pela reacção de transferência de electrões.

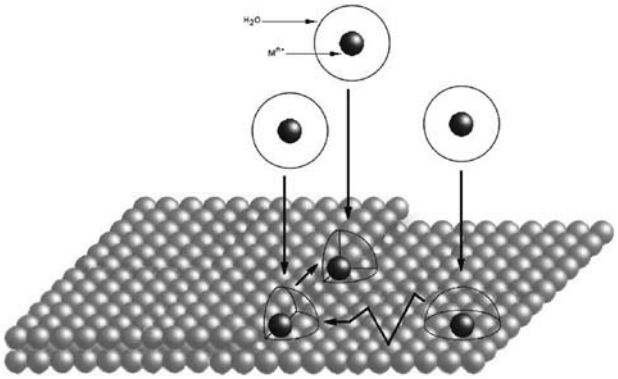


Fig. 6. Ilustração do mecanismo de transporte do ião, por difusão para a superfície do eléctrodo e incorporação no sítio preferencial.

Este processo ocorre em três passos gerais:

1.º FORMAÇÃO E CRESCIMENTO DE AGREGADOS (CLUSTERS)

Dois processos são determinantes:

1.º Adsorção da espécie à superfície do eléctrodo.
2.º Movimento das especies adsorvidas sobre a superfície do eléctrodo no sentido de se agruparem em agregados (clusters).

As espécies mantêm-se ligadas à superfície do eléctrodo de forma mais estavel uma vez que a sua energia livre de ligação aumenta.

O crescimento espontaneo dos agregados é devido a flutuações energéticas que permitem valores de energia livre locais acima do seu valor máximo.

2.º NUCLEAÇÃO

Ocupação de toda a superfície do eléctrodo com agregados clusters estaveis que constituem nucleos superficiais.

Para uma probabilidade uniforme com o tempo t o número de agregados clusters sobre o eléctrodo N é dado por:

$$N = N_o\left(1 - e^{-At}\right)$$

Sendo N_o o número de agregados por unidade de superfície que podem ser formados sobre o eléctrodo e a constante de velocidade de nucleação.

3.º CRESCIMENTO DOS NÚCLEOS SUPERFICIAIS

A velocidade de crescimento dos nucleos superficiais é determinada por dois passos:

1.º Incorporação no reticulo cristalino da especie do núcleo superficial a depositar.
2.º Difusão das espécies do electrólito para núcleos superfíciais.

Inicialmente os nucleos são independentes uns dos outros mas depois o seu crescimento é condicionado pelo do vizinho no ponto de contacto entre os dois resultando numa limitação do tamanho do seu crescimento.

6.1. Adsorção

Baseando-nos na energia de adsorção, ou seja a energia da interacção adsorbato-superfície, classificamos os fenómenos de adsorção em dois tipos básicos:

1.º Adsorção química onde as forças de atracção químicas actuam entre superfície e adsorbato (usualmente ligações covalentes), logo há uma combinação química entre a superfície e o adsorbato onde os electrões são partilhados ou transferidos. Novas configurações electrónicas são formadas pela partilha dos electrões.
2.º Adsorção física onde as forças de adsorção físicas, Van Der Waals, ou forças electrostáticas puras, operam entre a superfície e o adsorbato, não há nem transferência nem partilha de electrões.

A aproximação da partícula ao eléctrodo é inicialmente, em que está mais afastada, por adsorção física, mas à medida que se aproxima do eléctrodo muda para adsorção química.

As moléculas adsorvidas são continuamente desadsorvidas a uma velocidade igual à velocidade com que moléculas dissolvidas da solução ficam adsorvidas. Existe um equilíbrio dinâmico de adsorção.

6.1.1. Isotérmicas de Adsorção de Langmuir

Descrevem a relação entre o preenchimento da superfície pelo adsorbato θ_j de concentração c_j na solução a dada temperatura:

$$\theta_j = \frac{Kc_j}{1 + Kc_j}$$

Onde K é a constante de equilibrio de adsorção.

São baseadas num modelo que envolve as seguintes suposições:

1.º A energia de adsorção de todos os sitios é a mesma e não é afectada pela adsorção dos sitios vizinhos.
2.º A adsorção é movel
3.º Cada sitio acomoda uma única particula
4.º Especies adsorvidas não interactuam umas com as outras.

Certas moléculas são adsorvidas de forma orientada produzindo uma camada adsorvida de moléculas com uma orientação preferencial.

BIBLIOGRAFIA

Fundamentals of Electrochemical Deposition, M. Paunovic and M. Schlesinger, Wiley, New York, 1998.

Electroquímica, Princípios, Métodos e Aplicações, A. Brett e C. Brett, Almedina, Coimbra, 1996.

Manual de Química Física, G. Wedler, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2001.