Físico-Farmácia Aula 074 — Isoterma de Adsorção de Gibbs e Excesso de Concentração Interfacial de Tensoativo — Foco Avançado Parte 8

Por Cristiano Ricardo · Publicado em 28/04/2020

Aula 074 do Curso Completo de Físico-Farmácia e Engenharia com Prof. Cristiano Ricardo: Isoterma de Adsorção de Gibbs e Excesso de Concentração Interfacial de Tensoativo — Foco Avançado Parte 8. Termodinâmica, fenômenos interfaciais, reologia, processos industriais e 10 imagens técnicas.

Versão online e eventuais atualizações:
https://professor.cristianoricardo.com/post/fisico-farmacia-aula-074-isoterma-de-adsorcao-de-gibbs-e-excesso-

Físico-Farmácia · Engenharia Química de Formulações · Módulo 03: Fenômenos Interfaciais e Tensoativos
Aula 074 de 366 · Isoterma de Adsorção de Gibbs e Excesso de Concentração Interfacial de Tensoativo — Foco Avançado Parte 8

Diretriz Acadêmica Avançada para Farmácia e Engenharia Química · Ciclo de Formação 2020 · Prof. Cristiano Ricardo

Esta 74ª aula do Curso Completo de Físico-Farmácia e Engenharia Química de Processos Farmoquímicos aprofunda o domínio analítico, físico-químico e industrial sobre Isoterma de Adsorção de Gibbs e Excesso de Concentração Interfacial de Tensoativo — Foco Avançado Parte 8, inserido no escopo de Tensão Superficial, Balanço Hidrófilo-Lipófilo EHL e Adsorção de Gibbs. A física e a química farmacêutica modernas convergem para a modelagem rigorosa dos fenômenos de transporte, equilíbrios termodinâmicos de fases, reologia de formulações e termodinâmica estatística interfacial, estabelecendo os pilares fundamentais para o desenvolvimento de sistemas de liberação convencionais e carreadores nanotecnológicos de última geração com reprodutibilidade absoluta e estabilidade validada.

1. Fundamentação Teórico-Conceitual e Modelagem Físico-Química

O domínio da físico-farmácia constitui a interface mais nobre entre a termodinâmica fundamental, a mecânica dos fluidos e a farmacotécnica de precisão. Na perspectiva da ciência farmacêutica, cada propriedade molecular do ingrediente farmacêutico ativo (IFA), como seu momento dipolo, energia reticular cristalina, polarizabilidade e raio de van der Waals, dita a sua suscetibilidade à solvatação e permeabilidade biológica. Na perspectiva da engenharia química, esses mesmos atributos físico-químicos regem a perda de carga em tubulações sanitárias, a potência consumida por impelidores em reatores industriais e a

© 2026 Cristiano Ricardo · professor.cristianoricardo.com

cinética de transferência de massa durante as operações de cristalização e secagem.

No estudo específico de isoterma de adsorção de gibbs e excesso de concentração interfacial de tensoativo — foco avançado parte 8, a análise físico-química contempla a determinação precisa das variáveis de estado (pressão, temperatura, potencial químico mu e fração molar x). As interações intermoleculares de curto e longo alcance, quantificadas pelas forças atrativas de London-van der Waals, pontes de hidrogênio e repulsões coulombianas de dupla camada elétrica, governam a integridade coloidal e a estabilidade molecular ao longo de toda a cadeia logística do medicamento.

Postulado Físico-Farmacêutico: Nenhuma forma farmacêutica pode atingir eficácia terapêutica consistente se os fenômenos físico-químicos de transição de fase, escoamento reológico e difusão em interfaces não forem rigorosamente controlados sob a ótica da engenharia de processos.

Figura Técnica 074.1 — Fenômenos Interfaciais e Tensoativos: Diagrama teórico de equilíbrio termodinâmico, potenciais moleculares e cinética físico-química fundamental.

2. Equações Fundamentais, Fenômenos de Transporte e Dedução Matemática

A formalização matemática dos sistemas físico-farmacêuticos viabiliza a transição de formulações empíricas para a modelagem mecanicista baseada em princípios primeiros. Para Isoterma de Adsorção de Gibbs e Excesso de Concentração Interfacial de Tensoativo — Foco Avançado Parte 8, destacam-se as seguintes correlações fundamentais:

• Balanço de Energia Livre e Critério de Espontaneidade: A relação delta-G = delta-H - T * delta-S define a viabilidade de formação de sistemas dispersos, micelas e dispersões sólidas poliméricas. Processos associados a delta-G negativo ocorrem espontaneamente sob controle entrópico ou entálpico.

• Transporte de Massa e Fluxo Difusional de Fick: Pela primeira lei de Fick, o fluxo difusional J = -D * (dC/dx) é diretamente proporcional ao coeficiente de difusão de Stokes-Einstein (D = kB*T / (6*pi*eta*r)) e ao gradiente de concentração através da membrana ou camada limite.

• Termodinâmica Interfacial e Equação de Young-Laplace: A diferença de pressão delta-P = gamma * (1/R1 + 1/R2) através de superfícies curvas governa a pressão interna de gotículas em nanoemulsões e a capilaridade em leitos de pós porosos durante a granulação.

• Cinética de Dissolução e Difusão de Nernst-Brunner: A velocidade de dissolução dM/dt = (D*A/h)*(Cs - C) demonstra matematicamente que o aumento da área superficial específica (A) por micronização e a manutenção de condições sink (C << Cs) são imperativos para acelerar a liberação biofarmacêutica.

© 2026 Cristiano Ricardo · professor.cristianoricardo.com

3. Operações Unitárias Industriais e Engenharia de Processos Farmoquímicos

A engenharia de processos traduz os parâmetros de físico-farmácia em condições operacionais de escala industrial (tanques de mistura encamisados, reatores batelada e contínuos, moinhos de jato micronizadores, homogeneizadores de alta pressão e liofilizadores farmacêuticos industriais). No contexto de Isoterma de Adsorção de Gibbs e Excesso de Concentração Interfacial de Tensoativo — Foco Avançado Parte 8, são mandatórios os seguintes cuidados de engenharia:

Balanço Hidrodinâmico e Parâmetros Operacionais Críticos

1. Cisalhamento e Escalonamento em Tanques Misturadores: Em sistemas polifásicos (emulsões e suspensões), a taxa de cisalhamento local junto às pás do impelidor tipo rotor-estator atinge valores superiores a 10.000 s^-1. A potência por unidade de volume (P/V) deve ser estritamente dimensionada para evitar quebra excessiva de cadeias poliméricas termossensíveis ou aquecimento descontrolado por atrito viscoso.

2. Transferência Térmica e Refrigeração em Jaqueta: Reações de precipitação e neutralização exotérmicas exigem cálculo rigoroso do coeficiente global de transferência de calor (U), impedindo a formação de pontos quentes locais (hotspots) que induzem degradação térmica do fármaco ou desestabilização de tensoativos não iônicos acima de seu ponto de névoa (cloud point).

3. Fluidodinâmica Computacional CFD e Padrões de Mistura: A modelagem matemática por CFD previne a existência de zonas mortas de escoamento e vórtices centrais que causam aeração espumante e oxidação precoce de ativos lábeis.

Figura Técnica 074.2 — Fenômenos Interfaciais e Tensoativos: Fluxograma operacional industrial, instrumentação em linha e controle de processos de formulação farmacêutica.

4. Matriz Termodinâmica, Parâmetros Reológicos e Especificações Farmacopeicas

A tabela a seguir sistematiza as propriedades físico-químicas, descritores reológicos e métricas de controle analítico indispensáveis para o desenvolvimento e controle de qualidade lote a lote em Fenômenos Interfaciais e Tensoativos:

Tabela

Propriedade Físico-Química | Faixa Típica / Unidade SI | Significado na Farmácia Clínica | Significado na Engenharia Química
Tensão Interfacial (gamma) | 1,0 a 25,0 mN/m | Facilita a dispersão gastrintestinal e emulsificação espontânea com bile. | Governa a energia mecânica de homogeneização e consumo

de potência.
Potencial Zeta (|zeta|) | > 30 mV (positivo ou negativo) | Assegura suspensão uniforme sem formação de aglomerados compactos tóxicos. | Repulsão eletrostática prevenindo floculação rápida e colapso de fase.
Viscosidade Aparente (eta) | 50 a 5.000 mPa*s | Controla o tempo de residência na mucosa e a palatabilidade de xaropes. | Cálculo de perda de carga, regime de escoamento e seleção de bombas.
Tamanho Médio de Partícula (d50) | 100 nm a 45 micrometros | Determina a velocidade de dissolução e absorção oral ou pulmonar. | Eficiência de micronização, entupimento de bicos e sedimentação.
Capacidade Tamponante (beta) | 0,01 a 0,10 mol/(L*pH) | Evita dor e queimação na administração parenteral ou oftálmica. | Controle de corrosão de aço inoxidável 316L e estabilidade química.

5. Boas Práticas de Fabricação GMP, Controle de Qualidade e Conformidade ICH

Qualidade por Design (QbD) e Diretrizes Regulatórias Oficiais

Quality by Design (ICH Q8 / Q9): A abordagem contemporânea preconiza a identificação prévia do Perfil Alvo do Produto de Qualidade (QTPP) e dos Atributos Críticos de Qualidade (CQAs). No escopo de Isoterma de Adsorção de Gibbs e Excesso de Concentração Interfacial de Tensoativo — Foco Avançado Parte 8, parâmetros operacionais críticos (CPPs) como rotação de agitação, temperatura de emulsificação e perfil de pressão de vácuo são integrados a um Espaço de Projeto (Design Space) estatisticamente validado por metodologia de superfície de resposta (DoE).

Tecnologia Analítica de Processo (PAT): Implementação de sondas espectroscópicas em tempo real (NIR - Infravermelho Próximo, Raman e FBRM - Medição de Refletância de Feixe Focado) imersas diretamente no tanque de processo. Essa instrumentação possibilita o monitoramento in-line da transição polimórfica, distribuição de tamanho de cristais e homogeneidade de mistura, reduzindo desvios de processo e eliminando quarentenas analíticas demoradas.

6. Galeria Didática e Carrossel Interativo com 7 Cartões Técnicos de Fixação

Navegue pelos 7 cartões técnicos de alta resolução abaixo, elaborados com tipologia ampliada e contraste técnico para sintetizar conceitos estruturais, equações-chave e diretrizes operacionais de Fenômenos Interfaciais e Tensoativos. Clique nas setas laterais ou deslize para visualizar em modo expandido:

Recurso Didático Interativo: Os 7 cartões do carrossel acima consolidam princípios fundamentais de físico-farmácia e engenharia química para memorização e consulta em bancada e planta industrial.

© 2026 Cristiano Ricardo · professor.cristianoricardo.com

7. Problemas Numéricos de Físico-Farmácia e Engenharia com Resolução Comentada

Problema 1: Cálculo do Balanço Hidrófilo-Lipófilo Necessário para Blenda de Tensoativos

Para estabilizar uma emulsão tópica óleo em água (O/A) contendo 20% de óleo mineral líquido (EHL requerido = 10,5) e 10% de álcool cetílico (EHL requerido = 15,0), deseja-se formular uma mistura de Span 80 (monooleato de sorbitano, EHL = 4,3) e Tween 80 (polissorbato 80, EHL = 15,0). Calcule primeiramente o EHL crítico requerido da fase oleosa total e determine a proporção percentual de Span 80 e Tween 80 necessária na blenda surfactante.

Resolução Comentada Passo a Passo:

1. Determinação da fração da fase oleosa:
Óleo mineral: 20 g / 30 g totais de óleo = 0,667 (66,7%)
Álcool cetílico: 10 g / 30 g totais de óleo = 0,333 (33,3%)
EHL_req_total = (0,667 * 10,5) + (0,333 * 15,0) = 7,0035 + 4,995 = 12,00.
2. Cálculo da blenda de Span 80 e Tween 80:
Seja x a fração de Tween 80 (EHL = 15,0) e (1 - x) a fração de Span 80 (EHL = 4,3):
15,0 * x + 4,3 * (1 - x) = 12,0
10,7 * x + 4,3 = 12,0 => 10,7 * x = 7,7 => x = 7,7 / 10,7 = 0,7196 (72,0% de Tween 80 e 28,0% de Span 80).
Esta razão exata assegura o empacotamento interfacial ótimo e minimiza a tensão interfacial.

Problema 2: Cálculo do Balanço Hidrófilo-Lipófilo Necessário para Blenda de Tensoativos

Para estabilizar uma emulsão tópica óleo em água (O/A) contendo 20% de óleo mineral líquido (EHL requerido = 10,5) e 10% de álcool cetílico (EHL requerido = 15,0), deseja-se formular uma mistura de Span 80 (monooleato de sorbitano, EHL = 4,3) e Tween 80 (polissorbato 80, EHL = 15,0). Calcule primeiramente o EHL crítico requerido da fase oleosa total e determine a proporção percentual de Span 80 e Tween 80 necessária na blenda surfactante.

Resolução Comentada Passo a Passo:

1. Determinação da fração da fase oleosa:
Óleo mineral: 20 g / 30 g totais de óleo = 0,667 (66,7%)
Álcool cetílico: 10 g / 30 g totais de óleo = 0,333 (33,3%)
EHL_req_total = (0,667 * 10,5) + (0,333 * 15,0) = 7,0035 + 4,995 = 12,00.
2. Cálculo da blenda de Span 80 e Tween 80:
Seja x a fração de Tween 80 (EHL = 15,0) e (1 - x) a fração de Span 80 (EHL = 4,3):
15,0 * x + 4,3 * (1 - x) = 12,0
10,7 * x + 4,3 = 12,0 => 10,7 * x = 7,7 => x = 7,7 / 10,7 = 0,7196 (72,0% de Tween 80 e 28,0% de Span 80).
Esta razão exata assegura o empacotamento interfacial ótimo e minimiza a tensão interfacial.

© 2026 Cristiano Ricardo · professor.cristianoricardo.com

8. Glossário Técnico e Diretrizes de Integração Farmácia-Engenharia

Glossário Físico-Farmacêutico Especializado:

• Potencial Químico (mu): Derivada parcial da energia livre de Gibbs em relação ao número de mols de um componente sob temperatura e pressão constantes; força motriz termodinâmica universal para difusão e equilíbrio de fases.

• Camada Difusional de Nernst-Brunner: Filme líquido estagnado adjacente à superfície do sólido onde o transporte de soluto ocorre exclusivamente por difusão molecular molecular passiva.

• Pseudoplasticidade (Shear-Thinning): Propriedade reológica de fluidos não newtonianos em que a viscosidade diminui continuamente conforme a taxa de cisalhamento aplicada aumenta.

• Potencial Zeta (zeta): Diferencial de potencial eletrostático existente no plano de cisalhamento hidrodinâmico entre a superfície de uma partícula coloidal e o seio do meio dispersante.

• Amadurecimento de Ostwald (Ostwald Ripening): Crescimento espontâneo de cristais ou gotículas maiores em detrimento da dissolução de entidades menores devido à maior pressão de vapor e solubilidade dos raios de curvatura diminutos.

Diretriz Complementar · Integração Físico-Farmácia e Engenharia Química:

A sinergia entre o farmacêutico formulador e o engenheiro químico de processos representa a chave mestra para o sucesso na transposição de escala laboratorial para a indústria farmacêutica 4.0. Enquanto o farmacêutico domina a estabilidade molecular, o perfil biofarmacêutico BCS, a tolerabilidade tecidual e os requisitos farmacopeicos, o engenheiro químico projeta a dinâmica de escoamento, o balanço de energia dos reatores, a eficiência de secagem e a integridade de embalagens industriais. Essa colaboração interdisciplinar previne falhas caras de cristalização, sinérese em géis e quebra de emulsões, viabilizando medicamentos com máxima eficácia clínica e segurança aos pacientes.

© 2026 Cristiano Ricardo · professor.cristianoricardo.com