

Físico-Farmácia Aula 041 — Termodinâmica da Solubilização — Balanço de Entalpia Reticular versus Entalpia de Hidratação — Foco Avançado Parte 5

Por Cristiano Ricardo · Publicado em 10/09/2019

Aula 041 do Curso Completo de Físico-Farmácia e Engenharia com Prof. Cristiano Ricardo: Termodinâmica da Solubilização: Balanço de Entalpia Reticular versus Entalpia de Hidratação — Foco Avançado Parte 5. Termodinâmica, fenômenos interfaciais, reologia, processos industriais e 10 imagens técnicas.

Versão online e eventuais atualizações:

<https://farmaceutico.cristianoricardo.com/post/fisico-farmacia-aula-041-termodinamica-da-solubilizacao-balanco-d>

Físico-Farmácia · Engenharia Química de Formulações · Módulo 02: Solubilidade e Cinética de Dissolução

Aula 041 de 366 · Termodinâmica da Solubilização: Balanço de Entalpia Reticular versus Entalpia de Hidratação — Foco Avançado Parte 5

Diretriz Acadêmica Avançada para Farmácia e Engenharia Química · Ciclo de Formação 2019 · Prof. Cristiano Ricardo

Esta 41ª aula do Curso Completo de Físico-Farmácia e Engenharia Química de Processos Farmoquímicos aprofunda o domínio analítico, físico-químico e industrial sobre Termodinâmica da Solubilização: Balanço de Entalpia Reticular versus Entalpia de Hidratação — Foco Avançado Parte 5, inserido no escopo de Termodinâmica de Solvatação, Modelo de Noyes-Whitney e Liberação Intestinal. 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

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

No estudo específico de termodinâmica da solubilização: balanço de entalpia reticular versus entalpia de hidratação — foco avançado parte 5, a análise físico-química contempla a determinação precisa das variáveis de estado (pressão, temperatura, potencial químico μ 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 041.1 — Solubilidade e Cinética de Dissolução: 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 Termodinâmica da Solubilização: Balanço de Entalpia Reticular versus Entalpia de Hidratação — Foco Avançado Parte 5, destacam-se as seguintes correlações fundamentais:

- Balanço de Energia Livre e Critério de Espontaneidade: A relação $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$ define a viabilidade de formação de sistemas dispersos, micelas e dispersões sólidas poliméricas. Processos associados a ΔG negativo ocorrem espontaneamente sob controle entrópico ou entálpico.
- Transporte de Massa e Fluxo Difusional de Fick: Pela primeira lei de Fick, o fluxo difusional $J = -D \cdot (dC/dx)$ é diretamente proporcional ao coeficiente de difusão de Stokes-Einstein ($D = k_B \cdot T / (6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r)$) e ao gradiente de concentração através da membrana ou camada limite.
- Termodinâmica Interfacial e Equação de Young-Laplace: A diferença de pressão $\Delta P = \gamma \cdot (1/R_1 + 1/R_2)$ 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 $dM/dt = (D \cdot A/h) \cdot (C_s - C)$ demonstra matematicamente que o aumento da área superficial específica (A) por micronização e a manutenção de condições sink ($C \ll C_s$) são imperativos para acelerar a liberação biofarmacêutica.

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 Termodinâmica da Solubilização: Balanço de Entalpia Reticular versus Entalpia de Hidratação — Foco Avançado Parte 5, 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 041.2 — Solubilidade e Cinética de Dissolução: 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 Solubilidade e Cinética de Dissolução:

Tabela

Propriedade Físico-Química | Faixa Típica / Unidade SI | Significado na Farmácia Clínica | Significado na Engenharia Química

Tensão Interfacial (γ) | 1,0 a 25,0 mN/m | Facilita a dispersão gastrointestinal 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 (η) | 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 (d_{50}) | 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 (β) | 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 Termodinâmica da Solubilização: Balanço de Entalpia Reticular versus Entalpia de Hidratação — Foco Avançado Parte 5, 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 Solubilidade e Cinética de Dissolução. 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.

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

Problema 1: Cálculo da Taxa de Dissolução Inicial pela Equação de Noyes-Whitney

Um lote micronizado de fármaco pouco solúvel (BCS Classe II) possui área superficial específica total $A = 2,5 \text{ m}^2$ (25.000 cm^2), coeficiente de difusão em água $D = 5,4 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ e espessura da camada de difusão hidrodinâmica $h = 25 \text{ micrometros}$ ($25 \times 10^{-4} \text{ cm}$). A solubilidade de saturação do fármaco no meio de dissolução tamponado a 37°C é $C_s = 0,12 \text{ mg/mL}$ ($120 \text{ microgramas/cm}^3$). Supondo condições estritas de pia (sink conditions onde $C = 0$), determine a taxa inicial de dissolução (dM/dt) em mg por minuto.

Resolução Comentada Passo a Passo:

Pela equação de Noyes-Whitney modificada por Nernst-Brunner: $dM/dt = (D \cdot A / h) \cdot (C_s - C)$.

Substituindo os valores em unidades consistentes (cm, s, mg):

$$D = 5,4 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$A = 25.000 \text{ cm}^2$$

$$h = 2,5 \times 10^{-3} \text{ cm}$$

$$C_s = 0,12 \text{ mg/cm}^3$$

$$C = 0 \text{ (condição sink)}$$

$$dM/dt = [(5,4 \times 10^{-6} \cdot 25.000) / (2,5 \times 10^{-3})] \cdot 0,12 = [0,135 / 0,0025] \cdot 0,12 = 54 \cdot 0,12 = 6,48 \text{ mg/s.}$$

Convertendo para taxa por minuto: $6,48 \text{ mg/s} \cdot 60 \text{ s/min} = 388,8 \text{ mg/min}$.

Esta taxa confirma que a micronização com aumento da área interfacial acelera drasticamente a velocidade de dissolução inicial sob condições sink.

Problema 2: Estimativa de Solubilidade Dependente de pH para um Fármaco Ácido Fraco

O ibuprofeno é um ácido carboxílico fraco com $pK_a = 4,45$ e solubilidade intrínseca da forma molecular neutra $S_0 = 0,045 \text{ mg/mL}$ a 25°C . Calcule a solubilidade total aparente (S_{total}) em tampão gástrico em repouso ($\text{pH} = 1,45$) e em tampão intestinal duodenal ($\text{pH} = 6,45$).

Demonstre a relevância farmacotécnica da ionização entérica.

Resolução Comentada Passo a Passo:

Pela equação de solubilidade dependente do pH para ácidos fracos: $S_{\text{total}} = S_0 \cdot [1 + 10^{(\text{pH} - pK_a)}]$.

No estômago ($\text{pH} = 1,45$):

$$\text{pH} - pK_a = 1,45 - 4,45 = -3,00.$$

$$S_{\text{total}} = 0,045 \cdot [1 + 10^{-3}] = 0,045 \cdot 1,001 = 0,04505 \text{ mg/mL (praticamente igual à solubilidade intrínseca } S_0, \text{ com 99,9\% não ionizado).}$$

No duodeno ($\text{pH} = 6,45$):

$$\text{pH} - pK_a = 6,45 - 4,45 = +2,00.$$

$$S_{\text{total}} = 0,045 \cdot [1 + 10^{+2}] = 0,045 \cdot (1 + 100) = 0,045 \cdot 101 = 4,545 \text{ mg/mL.}$$

A solubilidade eleva-se em 101 vezes no ambiente entérico devido à formação do sal carboxilato ionizado polar solúvel.

8. Glossário Técnico e Diretrizes de Integração Farmácia-Engenharia

Glossário Físico-Farmacêutico Especializado:

- **Potencial Químico (μ):** 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.