

Físico-Farmácia Aula 135 — Viscoelasticidade Linear: Módulo de Armazenamento G Linha e Módulo de Dissipação G Duas Linhas — Foco Avançado Parte 14

Por Cristiano Ricardo · Publicado em 29/06/2021

Aula 135 do Curso Completo de Físico-Farmácia e Engenharia com Prof. Cristiano Ricardo: Viscoelasticidade Linear: Módulo de Armazenamento G Linha e Módulo de Dissipação G Duas Linhas — Foco Avançado Parte 14. Termodinâmica, fenômenos interfaciais, reologia, processos industriais e 10 imagens técnicas.

Versão online e eventuais atualizações:

<https://farmaceutico.cristianoricardo.com/post/fisico-farmacia-aula-135-viscoelasticidade-linear-modulo-de-armaz>

Físico-Farmácia · Engenharia Química de Formulações · Módulo 05: Reologia Farmacêutica e Escoamento de Fluidos

Aula 135 de 366 · Viscoelasticidade Linear: Módulo de Armazenamento G Linha e Módulo de Dissipação G Duas Linhas — Foco Avançado Parte 14

Diretriz Acadêmica Avançada para Farmácia e Engenharia Química · Ciclo de Formação 2021 · Prof. Cristiano Ricardo

Esta 135ª aula do Curso Completo de Físico-Farmácia e Engenharia Química de Processos Farmoquímicos aprofunda o domínio analítico, físico-químico e industrial sobre Viscoelasticidade Linear: Módulo de Armazenamento G Linha e Módulo de Dissipação G Duas Linhas — Foco Avançado Parte 14, inserido no escopo de Viscosimetria, Deformação de Newton, Pseudoplasticidade e Tixotropia. 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 viscoelasticidade linear: módulo de armazenamento G' e módulo de dissipação G'' — foco avançado parte 14, 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 135.1 — Reologia Farmacêutica e Escoamento de Fluidos: 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 Viscoelasticidade Linear: Módulo de Armazenamento G' e Módulo de Dissipação G'' Duas Linhas — Foco Avançado Parte 14, 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 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 ($D = k_B T / (6\pi\eta r)$) e ao gradiente de concentração através da membrana ou camada limite.
- **Termodinâmica Interfacial e Equação de Young-Laplace:** A diferença de pressão $\Delta P = \gamma \cdot (1/R_1 + 1/R_2)$ 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 Viscoelasticidade Linear: Módulo de Armazenamento G' Linha e Módulo de Dissipação G'' Duas Linhas — Foco Avançado Parte 14, 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 135.2 — Reologia Farmacêutica e Escoamento de Fluidos: 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 Reologia Farmacêutica e Escoamento de Fluidos:

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 Viscoelasticidade Linear: Módulo de Armazenamento G Linha e Módulo de Dissipação G Duas Linhas — Foco Avançado Parte 14, 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 Reologia Farmacêutica e Escoamento de Fluidos. 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: Ajuste do Modelo de Lei da Potência de Ostwald-de Waele para Gel Hidrofílico

Um gel oftálmico de Carbopol 974P submetido a ensaio de reometria rotacional a 25 °C apresentou as seguintes tensões de cisalhamento: $\tau_1 = 28,4$ Pa a uma taxa de deformação $\dot{\gamma}_1 = 10 \text{ s}^{-1}$, e $\tau_2 = 71,2$ Pa a $\dot{\gamma}_2 = 100 \text{ s}^{-1}$. Calcule o índice de comportamento de fluxo (n) e o índice de consistência (K) do modelo de Ostwald-de Waele ($\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$). Classifique o comportamento reológico do gel.

Resolução Comentada Passo a Passo:

Aplicando a equação linearizada por logaritmos:

$$\ln(\tau) = \ln(K) + n \cdot \ln(\dot{\gamma})$$

Subtraindo os pontos experimentais:

$$\ln(\tau_2 / \tau_1) = n \cdot \ln(\dot{\gamma}_2 / \dot{\gamma}_1)$$

$$\ln(71,2 / 28,4) = n \cdot \ln(100 / 10)$$

$$\ln(2,5070) = n \cdot \ln(10)$$

$$0,9191 = n \cdot 2,3026 \Rightarrow n = 0,9191 / 2,3026 = 0,399 \text{ (} \sim 0,40 \text{)}.$$

Calculando K com o primeiro ponto:

$$28,4 = K \cdot (10)^{0,40} \Rightarrow 10^{0,40} = 2,5119$$

$$K = 28,4 / 2,5119 = 11,31 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n.$$

Como $n = 0,40$ (< 1), o fluido é fortemente pseudoplástico (shear-thinning), propriedade ideal para colírios, pois reduz drasticamente a viscosidade durante o piscar (alta taxa de cisalhamento) e reconstitui a viscosidade em repouso retendo o fármaco na mucosa ocular.

Problema 2: Ajuste do Modelo de Lei da Potência de Ostwald-de Waele para Gel Hidrofílico

Um gel oftálmico de Carbopol 974P submetido a ensaio de reometria rotacional a 25 °C apresentou as seguintes tensões de cisalhamento: $\tau_1 = 28,4$ Pa a uma taxa de deformação $\dot{\gamma}_1 = 10 \text{ s}^{-1}$, e $\tau_2 = 71,2$ Pa a $\dot{\gamma}_2 = 100 \text{ s}^{-1}$. Calcule o índice de comportamento de fluxo (n) e o índice de consistência (K) do modelo de Ostwald-de Waele ($\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$). Classifique o comportamento reológico do gel.

Resolução Comentada Passo a Passo:

Aplicando a equação linearizada por logaritmos:

$$\ln(\tau) = \ln(K) + n \cdot \ln(\dot{\gamma})$$

Subtraindo os pontos experimentais:

$$\ln(\tau_2 / \tau_1) = n \cdot \ln(\dot{\gamma}_2 / \dot{\gamma}_1)$$

$$\ln(71,2 / 28,4) = n \cdot \ln(100 / 10)$$

$$\ln(2,5070) = n * \ln(10)$$

$$0,9191 = n * 2,3026 \Rightarrow n = 0,9191 / 2,3026 = 0,399 (\sim 0,40).$$

Calculando K com o primeiro ponto:

$$28,4 = K * (10)^{0,40} \Rightarrow 10^{0,40} = 2,5119$$

$$K = 28,4 / 2,5119 = 11,31 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n.$$

Como $n = 0,40 (< 1)$, o fluido é fortemente pseudoplástico (shear-thinning), propriedade ideal para colírios, pois reduz drasticamente a viscosidade durante o piscar (alta taxa de cisalhamento) e reconstitui a viscosidade em repouso retendo o fármaco na mucosa ocular.

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.