

DINÂMICA DA PERMEAÇÃO DE FLUIDOS, GRANDES DEFORMAÇÕES E TRANSPORTE DE SOLUTO EM HIDROGÉIS ESFÉRICOS

Natanaele S. Medeiros, natanaele.medeiros@itec.ufpa.br¹

Francisco S. Forte Neto, fforteneto@mecanica.coppe.ufrj.br²

Antônio G. B. da Cruz, aguicruz@ufpa.br¹

¹Faculdade de Engenharia Mecânica/ITEC, Universidade Federal do Pará, Brasil

²Programa de Engenharia Mecânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil

Resumo: Géis poliméricos são materiais que consistem de uma rede polimérica e um fluido intersticial presente na rede. Esses materiais possuem a capacidade de absorver grandes quantidades de fluido e sofrer grandes deformações mecânicas em resposta a estímulos ambientais externos. Em aplicações biomédica, géis poliméricos tem potencial para uso como transportadores de soluto ou fármacos e liberação em taxas controladas. Neste trabalho, apresentamos uma análise da dinâmica da permeação de fluidos considerando grandes deformações em um gel polimérico esférico, usado como transportador de um soluto, assumindo cenários de absorção a partir de uma solução bem diluída e liberação para um ambiente fluido. Consideramos uma teoria do contínuo não linear para grandes deformações de géis poliméricos que resulta da interação entre processos mecânicos e químicos acoplados. Adotamos um modelo de gel unidimensional com simetria esférica, cuja a solução foi obtida através de uma formulação de elementos finitos misto implementado na plataforma FEniCS. Os resultados predizem grandes mudanças de volume e permeação de soluto como função do tempo para vários módulos volumétricos em razão do inchaço e desinchaço de géis esféricos. Com base nos resultados, a capacidade de permeação e liberação do fluido e transporte de soluto são fortemente afetados pela elasticidade da rede polimérica. Para valores altos da elasticidade, notamos uma pequena quantidade de soluto carregado e liberado pelo gel. Por outro lado, para valores baixos desse módulo, temos uma maior mudança de volume e, consequentemente, apresentou uma maior quantidade de soluto absorvida e liberado pelo gel esférico.

Palavras-chave: géis poliméricos, difusão, grandes deformações, permeação de fluidos, transporte de soluto

1. INTRODUÇÃO

As propriedades de resposta a estímulos externos dos géis poliméricos são fatores que contribuem para o crescente interesse da aplicação desses materiais em diferentes campos, tais como entrega controlada de fármaco, engenharia de tecidos, microfluídica etc. Géis poliméricos são responsivos a diferentes estímulos físico-químicos do ambiente, como mudanças no pH, eletricidade, temperatura e umidade. Reações a tais estímulos são evidenciadas, por exemplo, como uma mudança no volume através do mecanismo de inchaço e secamento do gel (Sakai, 2020). Muitos géis poliméricos apresentam vantagens como rápida responsividade a estímulos externos, baixa toxicidade e biocompatibilidade (Fried and Puntel, 2020).

No campo particular da entrega controlada de fármacos, géis poliméricos têm potencial para uso como transportadores de soluto ou fármacos e liberação em taxas controladas (Caccavo *et al.*, 2020). De acordo com Xu *et al.* (2013), diversos estudos mostram que uma concentração excessiva de fármacos causa sérios efeitos colaterais ao corpo humano. Alguns fármacos administrados de forma oral possuem rápida ação, porém a alta quantidade liberada pode causar toxicidade ou efeitos colaterais, podendo apresentar um tempo de eficácia relativamente curto. A presença da rede polimérica promove redução da taxa de liberação e possibilita prolongar o tempo de liberação controlada (Xu *et al.*, 2013).

Neste trabalho, investigamos a dinâmica de permeação de fluidos e transporte de soluto considerando grandes deformações sofridas por um gel polimérico esférico. Para tal, adotamos uma teoria quimo-mecânica não linear que acopla difusão de fluidos e grandes deformações para prever o processo de absorção de fluidos e transporte de soluto em géis poliméricos introduzido por Duda *et al.* (2010). Adotamos um modelo esférico para estudar a dinâmica de permeação e liberação de soluto em géis poliméricos considerando processos de inchaço e desinchaço. O modelo foi implementado e resolvido usando um método de elementos finitos misto na plataforma FEniCS (Alnæs *et al.*, 2015). Os resultados e discussões serão apresentados com base na taxa de permeação de fluidos e massa de soluto absorvida e liberada pelo gel esférico.

Este artigo está estruturado da seguinte forma. Na Seção 2, definimos o problema e descrevemos o cenário proposto para análise do processo de permeação de fluidos no gel esférico. Na Seção 3, introduzimos a teoria de deformação não linear para géis poliméricos submetidos a grandes deformações e permeação de fluidos. A Seção 4 apresenta o método numérico usado para resolver as equações de evolução não lineares e acopladas para descrever o comportamento de géis esféricos. Na Seção 5, discutimos os resultados da dinâmica de absorção e liberação de soluto em um gel polimérico esférico sob os processos de inchaço e desinchaço. Na Seção 6, apresentamos as principais conclusões deste trabalho.

2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Neste trabalho, simulamos numericamente o comportamento de um gel esférico considerando dois cenários: (i) um processo de inchaço quando imerso em uma solução bem diluída, como mostrado na Fig.1a, e (ii) um processo de desinchaço com liberação da solução absorvida pelo gel quando imerso em um determinado ambiente com potencial químico menor, como mostrado na Fig.1b. Para esta análise, estendemos o cenário físico proposto por Curatolo *et al.* (2017), no qual consideramos um gel esférico em estado quase seco, inicialmente em equilíbrio, com raio inicial $A = 1$ mm, estiramento $\lambda_0 \simeq 1,006$, correspondente a um potencial químico $\mu_0 \simeq -6500$ J/mol obtido a partir de uma umidade relativa do ar de 0,07 e concentração $c_0 = 1006$ mol/m³. Assumimos que o gel esférico está imerso em uma solução muito diluída com $\mu_a \simeq 0$, sofrendo o processo de inchaço; consideramos que há um transporte de fluido e soluto da solução para o gel esférico sujeito a inchaço até que um novo estado de equilíbrio seja atingido, com $\mu_{\text{fluido}} = 0$ J/mol e raio $a_I > A$. Neste estado, o gel está completamente cheio com uma taxa de estiramento uniforme λ_∞^I e μ_∞^I . Utilizamos então os seguintes parâmetros no modelo numérico, módulo de cisalhamento $nk_B T = 50$ kPa, volume molar $v = 1,8 \times 10^{-5}$ mol/m³, difusividade do fluido no gel $D = 10^{-8}$ m²/s e entalpia de mistura $\chi = 0,4$.

Para a difusão e transporte do soluto assumimos que a solução diluída possui uma concentração de soluto $c_{sa} = 0,01$ mol/m³ com coeficiente de difusão do soluto no fluido $D_s = 10^{-10}$ m²/s e a concentração inicial de soluto deve ser uniforme na matriz do gel, $c_s(R, 0) = 0$ (Ninawe and Parulekar, 2012). Dados os parâmetros escolhidos, o estado de equilíbrio completamente cheio é caracterizado por $\lambda_\infty^I \simeq 3,13$ e $c_{s_\infty}^I \simeq 0,01$ mol/m³. Então, quando a esfera de gel é imersa em um solvente puro com $\mu_a = -10$ J/mol e soluto, $c_{s_0} = 0$, o processo de secamento se inicia até que atinja um novo estado de equilíbrio com raio a^{II} , e $A < a^{II} < a^I$. Após a liberação de todo o soluto e parte do solvente contidos no gel para a solução pura, temos um estado de equilíbrio completamente seco caracterizado por $\lambda_\infty^{II} \simeq 1,83$ e $c_{s_\infty}^{II} = 0$.

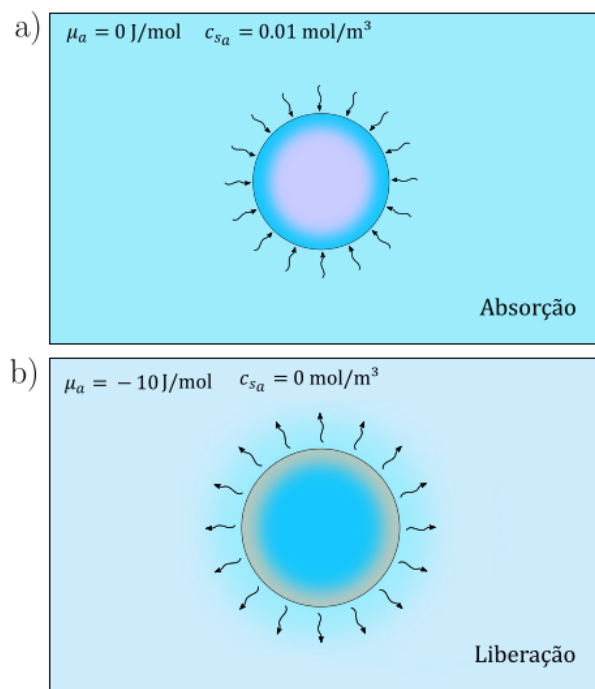


Figura 1: a) Esquemático do inchaço do hidrogel devido ao carregamento e b) desinchaço devido a liberação.

3. MODELO NÃO LINEAR PARA HIDROGEL ESFÉRICO

Consideramos uma extensão de um modelo não linear para difusão e grandes deformações em géis poliméricos introduzidos por (Duda *et al.*, 2010). Assumimos uma configuração de referência não deformada, onde $\mathcal{B}$ denota a matriz sólido-elástico livre de tensões e capaz de absorver um fluido intersticial. Um ponto material $\mathbf{X}$ em $\mathcal{B}$ é descrito por um conjunto de coordenadas ortonormais. A representação cinemática envolve os seguintes campos. Nós definimos o mapeamento de deformação do ponto material $\mathbf{X}$, no espaço de referência, em um ponto espacial $\mathbf{x}$, no espaço físico (configuração deformada) pela transformação dependente do tempo $\mathbf{y}(\mathbf{X}, t)$. O campo de deslocamento é $\mathbf{u}(\mathbf{X}, t) = \mathbf{y}(\mathbf{X}, t) - \mathbf{X}$. A

deformação da rede é caracterizada pelo tensor gradiente de deformação $\mathbf{F} = \nabla \mathbf{y} = \mathbf{I} + \nabla \mathbf{u}$. A concentração do fluido é $c(\mathbf{X}, t)$ e as espécies de soluto são $c_s(\mathbf{X}, t)$ no tempo t . Além disso, a permeação do fluido sob carregamentos mecânicos devem satisfazer a restrição $\det \mathbf{F} = 1 + v c$, onde v denota o volume ocupado pela molécula de fluido, e representa a clássica restrição que a matriz do sólido e do fluido são ambas incompressíveis.

De acordo com o estudo apresentado por Bertrand *et al.* (2016), o modelo esférico é adequado para um estudo numérico eficiente de grandes deformações volumétricas e comportamentos não lineares, como o analisado neste trabalho. Considere que, na configuração de referência, o corpo $\mathcal{B}$ é identificado como uma região esférica definida por:

$$\mathcal{B} := \{(R, \Theta, \Phi) | 0 \leq R \leq A, 0 \leq \Theta \leq 2\pi, 0 \leq \Phi \leq \pi\}, \quad (1)$$

onde um ponto material $\mathbf{X} = (R, \Theta, \Phi)$ em $\mathcal{B}$ é mapeado pelo movimento $\mathbf{y}$, ocupando a posição $\mathbf{x} = (r, \theta, \phi)$ na configuração deformada $\mathcal{B}_t = \mathbf{y}(\mathcal{B}, t)$. Assumindo simetria esférica em que o campo de deslocamento, o conteúdo de fluido e a concentração de espécies de soluto dependem majoritariamente da posição radial R e do tempo t , temos

$$\mathbf{u} = u(R, t)\mathbf{e}, \quad c = c(R, t) \quad \text{e} \quad c_s = c_s(R, t), \quad (2)$$

onde $\mathbf{e}$ é o vetor unitário ao longo da direção radial. Com essa suposição, o movimento $\mathbf{y}(\mathbf{x}, t)$ é definido por

$$r(R, t) = R + u(R, t), \quad \theta = \Theta, \quad \phi = \Phi, \quad (3)$$

em que o campo de deslocamento u segue $u(0, t) = 0$. O tensor gradiente de deformação $\mathbf{F}$ na representação matricial é $[\mathbf{F}] = \text{diag}\{\lambda_R, \lambda, \lambda\}$, onde $\lambda_R = \frac{\partial r(R, t)}{\partial R}$ é o estiramento radial e $\lambda = \frac{r(R, t)}{R}$ o estiramento circunferencial. Isso implica que o tensor de tensões $\mathbf{S}$ possui a seguinte representação matricial:

$$[\mathbf{S}] = \text{diag}\{S_{n_{RR}} - p\lambda^2, S_n - p\lambda_R\lambda, S_n - p\lambda_R\lambda\}, \quad (4)$$

onde $S_{n_{RR}} = nk_B T \lambda_R - \Pi \lambda^2$ é a componente de tensão da rede na direção radial e $S_n = nk_B T \lambda - \Pi \lambda_R \lambda$ é a componente da tensão da rede na direção circunferencial. Aqui, $nk_B T$ representa o módulo de elasticidade da rede polimérica, onde k_B é a constante de Boltzmann, T é a temperatura absoluta e p é a pressão ambiente. A pressão osmótica é dada por

$$\Pi = -\frac{k_B T}{v} \left(\ln \left(\frac{1-J}{J} \right) + \frac{1}{J} + \frac{\chi}{J^2} \right) + \frac{k_B T}{v} \frac{c_s}{(J-1)/v}, \quad (5)$$

definido em termos do jacobiano $J = \det \mathbf{F} = \lambda_R \lambda^2$.

As equações de balanço mecânica e de massa para a difusão do fluido e de soluto no gel em coordenadas esféricas são dadas por:

$$\frac{\partial S_{RR}}{\partial R} + \frac{2(S_{RR} - S_{\Theta\Theta})}{R} = 0, \quad \frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial R} (R^2 J_R) = -\frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} (R^2 J_{s_R}), \quad \dot{c}_s = -\frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} (R^2 J_{s_R}) \quad (6)$$

onde um ponto superposto denota a derivada material parcial em relação ao tempo, S_{RR} e $S_{\Theta\Theta}$ as componentes do tensor de tensões nas direções radial e circunferencial definidas na Eq.(4). A componente radial do fluxo de fluido relativo a rede, J_R , e do fluxo de soluto relativo ao fluido, $J_{s_R}^f$, são dadas por

$$J_R(R, t) = -\frac{D(\lambda_R \lambda^2 - 1)}{k_B T} \frac{1}{\lambda_R^2} \frac{\partial p}{\partial R} \quad \text{e} \quad J_{s_R}^f(R, t) = -\frac{D_s c_s}{k_B T} \frac{1}{\lambda_R^2} \frac{\partial \mu_s}{\partial R}, \quad (7)$$

onde μ_s representa o potencial químico do soluto,

$$\mu_s = \mu_s^0 + k_B T \left(\ln \frac{c_s}{c} \right). \quad (8)$$

Especificamos as seguintes condições de contorno, fisicamente consistentes, para as equações de governo (6).

- Condições de contorno para equação de balanço mecânico (6)₁:

$$u(R, t) = 0 \quad \text{em} \quad R = 0, \quad (9)$$

$$S_{RR} n_R = 0 \quad \text{em} \quad R = A. \quad (10)$$

- Condições de contorno para equação de balanço de massa para o fluido (6)₂:

$$n_R J_R = 0 \quad \text{em} \quad R = 0, \quad (11)$$

$$p(R, t) = 0 \quad \text{em} \quad R = A. \quad (12)$$

- Condições de contorno para equação de balanço de massa para o soluto (6)₃:

$$n_R J_{s_R}^f = 0 \quad \text{em} \quad R = 0, \quad (13)$$

$$c_s(R, t) = \bar{c}_s \quad \text{em} \quad R = A. \quad (14)$$

Consideramos ainda, a condição inicial na qual o gel está em equilíbrio e livre de tensões com um estiramento λ_0 . As condições iniciais são definidas como

$$r(R, 0) = \lambda_0 R, \quad p(R, 0) = \frac{\mu(R, 0) - \mu^0}{v} \quad \text{e} \quad c_s(R, 0) = c_{s_0}, \quad (15)$$

onde μ^0 representa o potencial químico de referência do fluido e c_{s_0} é a concentração inicial de soluto.

4. MÉTODO NUMÉRICO

As equações de balanço que descrevem o processo de deformação e permeação de fluidos num gel esférico, Eq.(6), foram resolvidas usando um método de elementos finitos mistos implementado na plataforma FEniCS, considerando a seguinte formulação variacional semi-discreta equivalente: determinar u^{n+1} , p^{n+1} e c_s^{n+1} , tal que

$$\begin{aligned} \int_0^A \left(\frac{\partial \tilde{u}}{\partial R} S_{RR}^{n+1} + 2S_{\Theta\Theta}^{n+1} \frac{\tilde{u}}{R} \right) R^2 dR + \int_0^A \left(\tilde{p} J^{n+1} - \Delta t v \frac{\partial \tilde{p}}{\partial R} J_R^{n+1} - \tilde{p} J^n \right) R^2 dR \\ + \int_0^A \left(\tilde{c}_s c_s^{n+1} - \Delta t \frac{\partial \tilde{c}_s}{\partial R} J_{sR}^{n+1} - \tilde{c}_s c_s^n \right) R^2 dR = 0, \end{aligned} \quad (16)$$

para qualquer variável admissível $\tilde{u}$, $\tilde{p}$ e $\tilde{c}_s$ escolhidos em espaços funcionais apropriados. As condições de contorno (9)-(13) prescritas para as equações de governo satisfazem a forma variacional equivalente do problema forte (6). O método de elementos finitos mistos usado para resolver o problema variacional acima foi introduzido em um trabalho prévio (Medeiros *et al.*, 2020), e emprega elementos quadráticos para o campo de deslocamento u^{n+1} e lineares para interpolar os campos de concentração de soluto c_s^{n+1} e pressão p^{n+1} ; para discretização no tempo, adotamos o método de Euler implícito. Empregamos uma função rampa no tempo para suavização da condição de contorno de pressão, além do método de Newton-Raphson para solução do sistema de equações discretas não lineares, como introduzido por (Wang *et al.*, 2018). O método é convergente em todas as simulações realizadas, com uma tolerância de 10^{-5} . Os resultados numéricos a seguir são independentes da malha, e usando um passo de tempo da ordem de 10^{-3} para evolução temporal.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Simulamos numericamente o comportamento do gel polimérico esférico, considerando os parâmetros físicos para os cenários de absorção e liberação definidos na Seção 2. A Figura 2 mostra a mudança de volume de um gel esférico para diferentes módulos de elasticidade $nk_B T$ em função do tempo. A capacidade de absorção de fluido do gel muda conforme variamos os valores do módulo de elasticidade $nk_B T$, que sofre mudança com a variação do número de ligações cruzadas da rede polimérica n . É interessante notar que quanto mais elástica é a rede (i.e., baixos valores de $nk_B T$), maior é a quantidade de fluido permeado e maior é o inchaço (Fig. 2a). Por outro lado, notamos um comportamento similar para o processo de liberação do fluido durante o secamento (Fig. 2b).

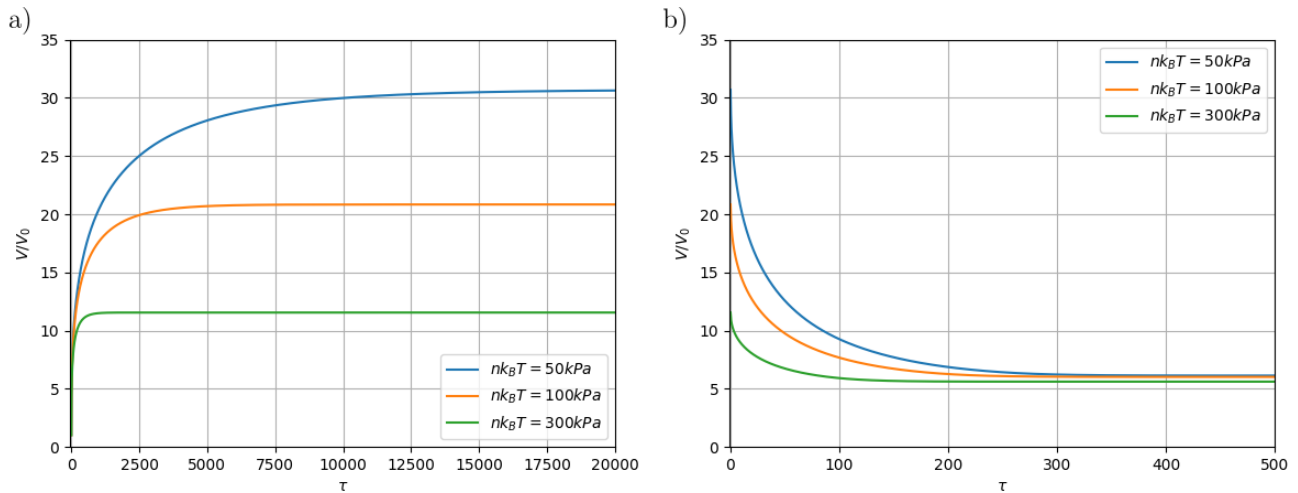


Figura 2: Mudança de volume do hidrogel esférico em função do tempo durante o processo de absorção (a) e liberação (b).

A Figura 3 mostra a quantidade de moléculas de soluto absorvida e liberada pelo gel esférico em função do tempo de inchaço para diferentes módulos de elasticidade $nk_B T$. A quantidade de soluto no hidrogel em relação a configuração de referência é obtida por

$$m_s(t) = 4\pi \int_0^A c_s(R, t) J R^2 dR \quad (17)$$

onde m_∞ representa o valor da quantidade de soluto no gel em equilíbrio. Podemos notar que a capacidade de permeação e liberação do gel é fortemente alterada de acordo com a elasticidade da rede, para valores altos do módulo de elasticidade, temos uma pequena quantidade de soluto carregado e liberado pelo gel. Entretanto, para valores mais baixos desse módulo, temos uma maior mudança de volume, e consequentemente temos uma maior quantidade de soluto absorvida e liberada pelo gel Fig.3.

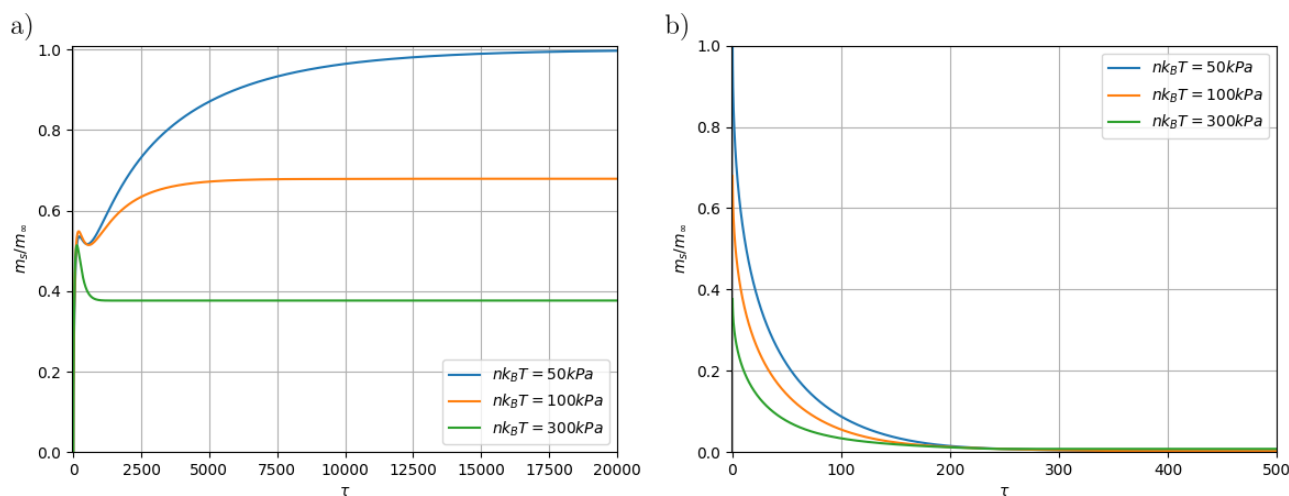


Figura 3: Quantidade de soluto absorvido (a) e liberado (b) pelo gel esférico em função do tempo de inchaço e secamento.

A mudança de volume de um material está relacionada com o número de ligações cruzadas da rede polimérica, pois este determina a elasticidade do material e quanto menor o número dessas ligações, maior é a capacidade de afastamento das cadeias poliméricas entre si. Portanto, mais espaço é gerado entre essas cadeias, permitindo assim uma maior mudança no volume e captação de moléculas de soluto devido a quantidade de solução absorvida pelo hidrogel.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho, investigamos a dinâmica de absorção e liberação fluido e transporte de solutos em um gel esférico imerso em uma solução com volume infinito. Para análise, estendemos uma teoria não linear para grandes deformações, permeação de fluidos e transporte de soluto em géis poliméricos. Descrevemos a evolução da deformação de géis esféricos, quantidade de soluto absorvida e liberada, atreladas a mudanças de volume do gel para diferentes módulos de elasticidade em função do tempo de inchaço e secamento. Os resultados fornecem informações sobre quantidades que são difíceis de medir em experimentos, como as mudanças de volume e a massa de soluto absorvida durante o processo de inchaço e liberada durante o secamento.

Futuras análises serão realizadas considerando um cenário físico apropriado para uma investigação do papel desempenhado pela grande deformação sofrida pelo gel e seu efeito no transporte de soluto comparado a pequenas deformações de géis, assumindo uma solução ambiente com volume finito.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior–CAPES pelo suporte financeiro (Código: 88881.200549/2018-01).

8. REFERÊNCIAS

- Alnæs, M., Blechta, J., Hake, J., Johansson, A., Kehlet, B., Logg, A., Richardson, C., Ring, J., Rognes, M.E. and Wells, G.N., 2015. “The fenics project version 1.5”. *Archive of Numerical Software*, Vol. 3, No. 100.
- Bertrand, T., Peixinho, J., Mukhopadhyay, S. and MacMinn, C.W., 2016. “Dynamics of swelling and drying in a spherical gel”. *Physical Review Applied*, Vol. 6, No. 6, p. 064010.
- Caccavo, D., Lamberti, G. and Barba, A.A., 2020. “Mechanics and drug release from poroviscoelastic hydrogels: Experiments and modeling”. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, Vol. 152, pp. 299–306.
- Curatolo, M., Nardinocchi, P., Puntel, E. and Teresi, L., 2017. “Transient instabilities in swelling dynamics”. *arXiv preprint arXiv:1704.08201*.
- Duda, F.P., Souza, A.C. and Fried, E., 2010. “A theory for species migration in a finitely strained solid with application to polymer network swelling”. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 58, No. 4, pp. 515–529.
- Fried, E. and Puntel, E., 2020. “Thematic issue of mechanics of materials: Mechanics, chemistry, and thermodynamics of gels”.
- Medeiros, N.S., Da Cruz, A. and Duda, F.P., 2020. “Dynamics of fluids permeation and solute transport in a spherical polymer gel”. *Proceedings of the 18th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*, 2020.

- Ninawe, P.R. and Parulekar, S.J., 2012. "Drug delivery using stimuli-responsive polymer gel spheres". *Industrial & engineering chemistry research*, Vol. 51, No. 4, pp. 1741–1755.
- Sakai, T., 2020. *Physics of polymer gels*. John Wiley & Sons.
- Wang, X., Zhai, Z., Chen, Y. and Jiang, H., 2018. "A facile, robust and versatile finite element implementation to study the time-dependent behaviors of responsive gels". *Extreme Mechanics Letters*, Vol. 22, pp. 89–97.
- Xu, Y., Jia, Y., Wang, Z. and Wang, Z., 2013. "Mathematical modeling and finite element simulation of slow release of drugs using hydrogels as carriers with various drug concentration distributions". *Journal of pharmaceutical sciences*, Vol. 102, No. 5, pp. 1532–1543.

9. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DYNAMIC OF FLUID PERMEATION, LARGE DEFORMATION AND SOLUTE TRANSPORT IN SPHERICAL HYDROGELS

Natanaele S. Medeiros, natanaele.medeiros@itec.ufpa.br¹

Francisco S. Forte Neto, fforteneto@mecanica.coppe.ufrj.br²

Antônio G. B. da Cruz, aguicruz@ufpa.br¹

¹Faculdade de Engenharia Mecânica/ITEC, Universidade Federal do Pará, Brasil

²Programa de Engenharia Mecânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil

Resumo: Polymer gels are materials that consist of a polymeric network and an interstitial fluid present in the network. These materials can absorb a large amount of fluid and undergo large mechanical deformations in response to external environmental stimuli. In biomedical applications, polymeric gels have the potential to be used as drug carriers. In this work, we present an analysis of fluid permeation dynamics considering large deformations in a spherical polymer gel used as a carrier of solute, assuming scenarios of uptaking from a well-diluted solution and release to a fluid environment. We extend a nonlinear theory for large deformations and fluid permeation of polymer gels that couple mechanical and chemical processes. We adopted a unidimensional model with spherical symmetry whose solution is obtained through a mixed finite element formulation implemented in the FEniCS platform. The results predict large volume changes and solute permeation as a function of time for several volumetric moduli due to swelling and deswelling processes. The fluid permeation and release of solute are strongly affected by the polymeric network. For high values of elasticity modulus, we noted a small amount of solute carried and released by the gel. Otherwise, for the lower values of elasticity, we have a large volume change, a greater amount of solute is absorbed and released by the spherical gel.

Palavras-chave: polymeric gels, diffusion, large deformations, fluid permeation, solute transport