

Modelagem Matemática e Computacional da Injeção de Ácidos em Meios Porosos

Larissa Matos¹, Eduardo R. Gomes, Sidarta A. Lima, Adriano dos Santos
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal, RN

A dedução de modelos matemáticos e computacionais capazes de quantificar o fenômeno de dissolução, durante o transporte de solutos em meios porosos, vem sendo amplamente apresentada na comunidade científica nas últimas décadas [3, 6]. Nesse contexto, a compreensão precisa dos fenômenos envolvidos desempenha um papel de fundamental importância em vários domínios das engenharias civil e do petróleo [4]. Em particular, com o objetivo de melhorar a injetividade do fluido e estimular a produção de óleo e gás, uma alternativa promissora na indústria de petróleo consiste no processo de acidificação. A técnica corresponde na injeção de uma solução aquosa acidificada capaz de produzir a dissolução do meio poroso na vizinhança dos poços, ocasionando o aumento da permeabilidade que pode favorecer o aumento da injetividade do fluido [7].

Neste trabalho, o objetivo principal é deduzir uma modelagem matemática e computacional para o processo de dissolução em meios porosos, durante a injeção de uma solução aquosa acidificada. Para tanto, considerando o escoamento monofásico, a modelagem da hidrodinâmica é quantificada pela lei de conservação do momento linear dada pela lei de Darcy, juntamente com a lei de conservação da massa da solução aquosa incompressível [1]. Postulando uma distribuição espacial inicial para o campo de porosidade, a permeabilidade é obtida fazendo uso de uma lei do tipo Kozeny-Carman [1]. Além disso, para deduzir a equação para o transporte do ácido na fase aquosa, fazemos uso do balanço de massa do soluto, resultando em uma equação diferencial parcial em regime convectivo-difusivo-reativo [7]. Neste contexto, o termo reativo associado à dissolução é quantificado por uma lei empírica proposta por Balakotaiah et. al. [6]. Por sua vez, o termo de adsorção é modelado por uma isoterma de Langmuir [10]. Finalmente, para mensurar a variabilidade do campo de porosidade devido ao fenômeno de dissolução, realizamos o balanço de massa da fase sólida, a qual resulta em uma lei de cinética dada por uma equação diferencial ordinária de 1^a ordem [7].

Do ponto de vista computacional, para a discretização do modelo hidrodinâmico utilizamos o método de elementos finitos Galerkin [5]. Vale destacar que, para a equação do transporte em regime convectivo dominante onde ocorre altos valores do número de Péclet, o método de Galerkin pode apresentar perda de acurácia devido ao surgimento de oscilações espúrias [2, 8]. Neste contexto, implementamos um método numérico capaz de melhorar a estabilidade numérica do método de Galerkin e preservar propriedades ótimas de estabilidade mediante o acréscimo de um termo de perturbação à formulação clássica de Galerkin, o qual é comumente denominado Streamline Upwind Petrov-Galerkin (SUPG) [2]. Por outro lado, considerando a influência do termo reativo da equação do transporte, podemos inferir que para altos valores do número de Damkohler o método SUPG não é recomendado e sofre devido ao surgimento de oscilações espúrias [8]. Diante disso, implementamos uma nova formulação estabilizada, cujo termo de perturbação adicionado à formulação de Galerkin incorpora os termos presentes na formulação SUPG juntamente com uma componente adicional associada ao termo de dissolução, comumente denominada Unusual Stabilized Finite Element Method (USFEM) [8]. Finalmente, de posse da concentração do soluto, o

¹larissades.matos@gmail.com

campo de porosidade é quantificado pela equação de cinética de dissolução utilizando o método de Runge-Kutta.

Com o objetivo de demonstrar as potencialidades do modelo matemático e computacional proposto, realizamos algumas simulações numéricas em domínios 2D/3D discretizados com malhas triangulares e tetraédricas aplicadas à hidrodinâmica da solução aquosa incompressível e ao transporte de solutos em meios porosos considerando o efeito da dissolução. Para analisar a acurácia e estabilidade das formulações discretas propostas, as soluções numéricas obtidas são comparadas com algumas soluções analíticas propostas na literatura, em que os resultados obtidos foram satisfatórios [9]. Finalmente, o modelo computacional é aplicado à simulação do processo de dissolução em meios porosos heterogêneos, com o objetivo de analisar a variabilidade dos campos de porosidade e permeabilidade, bem como a formação de wormholes durante o processo de dissolução na vizinhança de poços em reservatórios.

Referências

- [1] Bear J.; Cheng A. H. D. **Modeling groundwater flow and contaminant transport**. Springer, 2010. ISBN: 978-1-4020-6681-8.
- [2] Alexander N. Brooks; Thomas J.R. Hugues. “Streamline upwind/Petrov-Galerkin formulations for convection dominated flows with particular emphasis on the incompressible Navier-Stokes equations”. Em: **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering** 32 (1982), pp. 199–259. DOI: 10.1016/0045-7825(82)90071-8.
- [3] P. Liu X.; Ormond A.; Bartko K.; Ying L.; Ortoleva. “A geochemical reaction-transport simulator for matrix acidizing analysis and design”. Em: **Journal of Petroleum Science and Engineering** 17 (1997), pp. 181–196. DOI: 10.1016/s0920-4105(96)00064-2.
- [4] Liu P.; Yao J.; Couples G. D.; Ma G.; Iliev O. “3-D modelling and experimental comparison of reactive flow in carbonates under radial flow conditions”. Em: **Scientific Reports** 7 (2017), pp. 1–10. DOI: 10.1038/s41598-017-18095-2.
- [5] Becker E. B.; Carey G. F.; Oden J. T. **Finite Elements, an introduction: Volume I**. 6a. ed. Prentice Hall, 1981. ISBN: 978-0133170573.
- [6] Kalia N.; Balakotaiah V. “Effect of medium heterogeneities on reactive dissolution of carbonates”. Em: **Chemical Engineering Science** 64 (2009), pp. 376–390. DOI: 10.1016/j.ces.2008.10.026.
- [7] Panga M. K. R.; Ziauddin M.; Balakotaiah V. “Two-scale continuum model for simulation of wormholes in carbonate acidization”. Em: **AIChE Journal** 51 (2005), pp. 3231–3248. DOI: 10.1002/aic.10574.
- [8] L.P. Franca; F. Valentin. “On an improved Unusual Stabilized Finite Element Method for the advective-reactive-diffusive equation”. Em: **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering** 190 (2000), pp. 1785–1800. DOI: 10.1016/s0045-7825(00)00190-0.
- [9] L.P. Franca; F. Valentin. “On an improved unusual stabilized finite element method for the advective-reactive-diffusive equation”. Em: **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering** 190 (2000), pp. 1785–1800. DOI: 10.1016/s0045-7825(00)00190-0.
- [10] Chen Z.; Huan G.; Ma Y. **Computational Science Engineering**. 2a. ed. Siam, 2006. ISBN: 978-0-89871-606-1.