

IV Simpósio Paranaense de Modelagem, Simulação e Controle de Processos ISSN : 1984-7521	Artigo: 28
	Páginas: 205 - 212

INJEÇÃO DE CO₂ + ÁGUA EM ROCHAS CARBONÁTICAS

Gustavo R. Machado^{1*}, Luiz F. de Lima Luz. Jr¹.

*1 – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Paraná – UFPR – PR,
gustavo.rossetim@ufpr.br*

A injeção de água carbonatada em reservatórios de petróleo demanda o desenvolvimento de modelos matemáticos capazes de descrever, de forma satisfatória, o comportamento de rochas carbonáticas quando em contato com soluções salinas contendo gás carbônico em condições supercríticas. A pesquisa se torna mais relevante frente a constante necessidade de avançar em estudos que permitam mitigar a presença CO₂ na atmosfera e, por outro lado, elevar o rendimento da extração de petróleo residual em sistemas geológicos. O objetivo do trabalho é apresentar dados a partir de softwares de fluidodinâmica computacional para posteriormente validá-los experimentalmente em um sistema reacional poroso no qual ocorrem reações de precipitação e dissolução de CaCO₃, presentes em rochas carbonáticas. As informações obtidas das simulações computacionais realizadas são de queda de pressão relacionada ao escoamento no meio poroso além do comportamento térmico do sistema de reator e banho maria.

Palavras-chave: extração de petróleo, fluidodinâmica computacional, escoamento reacional em meio poroso.

Introdução

Presente diretamente ou indiretamente em diversos setores e atividades, o petróleo é um bem indispensável para o funcionamento da sociedade atualmente, visto que é a partir desse que são gerados gasolina, parafina, GLP, produtos asfálticos e óleos em geral [1]. Devido à sua vasta gama de aplicações e ao aumento populacional recente, diversos estudos e investimentos vêm sendo realizados com o propósito de elevar a extração desse recurso natural.

Algumas técnicas vêm sendo estudadas a fim de validar a sua utilização em campo, sendo uma delas a injeção de gás carbônico. Junto à proposta de elevar a recuperação de petróleo de reservatórios subterrâneos, essa técnica visa também à redução de emissão de CO₂ para a atmosfera, consistindo na captura e armazenamento do gás em sistemas geológicos reservatórios de petróleo. Esse tipo de aplicação pode ser denominado como EOR (enhanced oil recovery – recuperação avançada de petróleo) quando utilizado para extração de petróleo e CGS (CO₂ geological sequestration – sequestro geológico de CO₂) quando aplicado para retenção de gás carbônico no subsolo.

A fim de elevar a extração, a técnica de CWI (carbonated water injection – injeção de água gaseificada) foi desenvolvida. Essa técnica consiste em injeção de água do mar com CO₂ dissolvido em reservatórios, visando a pressurização daqueles que estão sendo explorados e consequente aumento da produção [2]. Cerca de 20% do petróleo pode ser retirado dos reservatórios sob sua própria pressão, entretanto com o emprego do CWI é possível elevar a extração em até 2,5 vezes, alcançando aproximadamente 50% de extração [3].

Apesar da efetividade das técnicas, ambas possuem desafios relacionados à interação das fases com o meio. Reações de dissolução e precipitação ocorrem entre a água gaseificada, uma solução ácida, e a rocha, o que leva a alterações locais e globais na porosidade e consequentemente na permeabilidade do reservatório, alterando assim a dinâmica do escoamento na extração. Além disso, há a formação de caminhos preferenciais (wormholes) que reduzem a extração do petróleo e causam instabilidades na rocha, levando a uma drástica queda na eficiência do método [4].

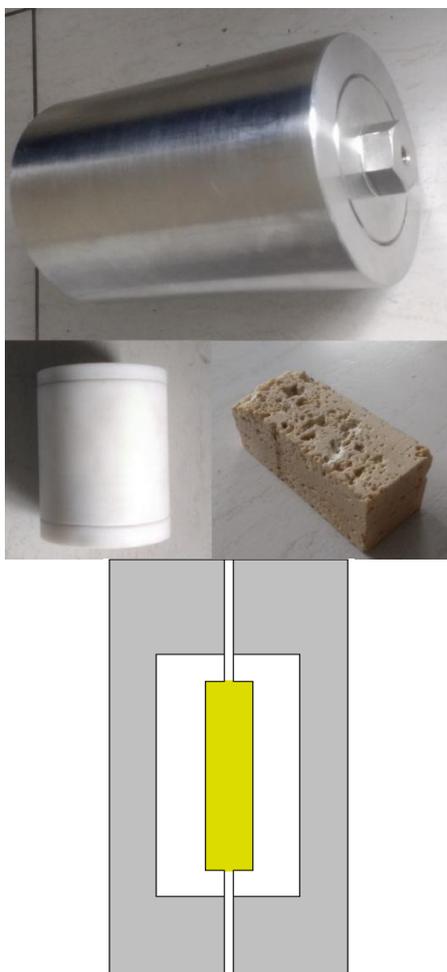
**14 e 15 de março de 2019
Curitiba - Paraná**

Devido a isso, é necessário o estudo do comportamento desse sistema em condições semelhantes às de extração em campo. Portanto, é utilizado um sistema de reator PBR a elevadas pressões em diferentes temperaturas a fim de se analisar as alterações na rocha, como porosidade, permeabilidade e alterações macroscópicas, além das características do escoamento, como a variação de pressão e temperatura. Junto a isso, são realizadas simulações computacionais através do software Ansys® Fluent 19.1 do escoamento no sistema com o objetivo de comparar os dados e validar o modelo para predição do comportamento do sistema, recolhendo informações como perda de carga, perfil do escoamento e variação de temperatura e velocidade no interior do reator.

Metodologia

A fim de analisar o comportamento do escoamento em meios porosos e obter dados a respeito do sistema real a ser estudado, foram realizadas simulações no software Ansys® *Fluent* 19.1, as quais representam os equipamentos do processo. O sistema consiste em um reator cilíndrico de aço inoxidável, o qual possui uma cápsula interna de nylon na qual será inserida a rocha porosa. Além disso, nas simulações são consideradas as tubulações adjacentes ao reator e o meio exterior a ele, que consiste de água aquecida por um equipamento banho maria. Tendo em mão as dimensões de todos os componentes do sistema foi possível representar as geometrias em cortes planares bidimensionais no centro dos meios representados utilizando o software *SpaceClaim*, a partir das quais foram geradas as malhas posteriormente no programa *Meshing*. A Figura 1 abaixo apresenta os componentes do sistema real e também possui uma representação esquemática da modelagem do sistema.

Figura 1 – Reator metálico, porta amostra de nylon e rocha porosa do sistema representado e ao lado uma representação esquemática bidimensional do sistema.



Na representação do sistema acima, a região acinzentada se refere à região metálica do reator. A região retangular branca adjacente é o porta amostra de nylon, enquanto a região interna a essa, em amarelo, se trata da rocha carbonática depositada no interior. As duas regiões restantes, as quais se iniciam na rocha e terminam nas extremidades do esquema, representam a tubulação que conduz o escoamento.

Foram realizados ao todo quatro conjuntos de simulações de escoamento de água: escoamento pela rocha porosa; escoamento pelas tubulações e cápsula de nylon sem a rocha, a qual é realizada em tubulações de igual diâmetro das representadas no esquema com o tamanho de 72 centímetros; escoamento pela tubulação de entrada do reator e escoamento pelo reator, a qual leva em consideração todo o sistema reator, porta amostra e pedra rochosa.

As simulações do escoamento pela rocha carbonática foram realizadas utilizando a opção de meio pseudo-homogêneo para representar a porosidade da rocha, tendo as resistências do escoamento calculadas através do guia disponibilizado pelo *software*. Ao todo foram realizadas 120 simulações alterando a porosidade do meio, com valores entre 0,05 a 0,30; a velocidade de escoamento, com valores entre 5 ml/min a 40 ml/min; e a quantidade de partículas presente no leito fixo, as quais foram testadas para os valores de 100, 1000, 10000 e 100000. A quantidade de partículas presentes no leito vem da necessidade de caracterizar o diâmetro das partículas no programa utilizado para simulação, já que é a partir dessa informação que são calculadas as resistências do escoamento, apesar do fato de a rocha não se comportar como um leito de partículas.

Das simulações foi possível obter o perfil de velocidade do escoamento assim como a distribuição e variação de pressão do leito.

As simulações das tubulações foram realizadas para se calcular a perda de carga somente relacionada as paredes dos tubos entre os medidores de pressão e da porta-amostra de nylon no interior do reator. Dessa forma, será possível na etapa experimental determinar a partir da leitura dos medidores de pressão qual a perda de carga relacionada ao meio poroso e qual provém do escoamento pela tubulação. Na Figura 2 é apresentada uma representação fora de proporção da tubulação, a qual possui esse formato devido às espirais do sistema real.

Figura 2 – Representação esquemática da tubulação simulada.



As simulações restantes, do escoamento pela tubulação e pelo interior do reator, foram realizadas para analisar o perfil de temperatura no interior do reator e das tubulações, visto que todo o sistema será imerso em um equipamento banho maria. O sistema como todo foi inicializado na temperatura ambiente de 25°C enquanto as paredes externas do sistema foram fixadas na temperatura do banho maria de 40°C, 60°C e 80°C. Para as tubulações foram realizadas as simulações considerando regime permanente enquanto para o reator as simulações foram em regime transiente e foram extraídos os dados nos tempos de dois minutos, vinte minutos e uma hora.

A partir dos resultados obtidos é possível determinar após quanto tempo de aquecimento os equipamentos terão atingido o equilíbrio térmico, podendo assim ser iniciado o experimento.

O tipo de regime de escoamento foi definido pelo número de Reynolds da dada vazão no comprimento característico de cada conjunto de simulações. Dentre os modelos de viscosidade, o laminar foi escolhido para os escoamentos laminares e o

standard k-epsilon para os escoamentos que se apresentassem turbulentos, os quais também foram inicializados com uma intensidade de turbulência de 5% e um diâmetro hidráulico de entrada e saída do elemento como 26mm.

Para todas as simulações foram realizados testes de malha, os quais consistem em alterar a qualidade da malha para verificar se esta não havia influenciado nos resultados das simulações.

Resultados e Discussão

1. Simulações da rocha porosa

Os dados mais relevantes obtidos através das simulações da rocha porosa para as condições testadas se encontram na Tabela 1, na qual são apresentados os valores de perda de carga simulados para valores de porosidade e vazão no leito considerando 100000 partículas.

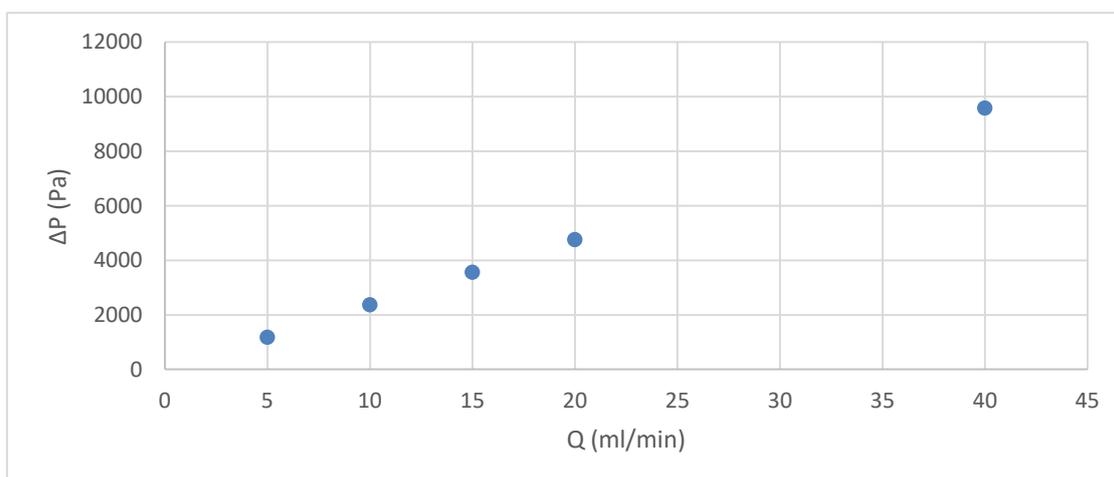
Tabela 1 - Perda de carga simulada para o leito com 100000 partículas.

Porosidade	5 ml/min	10 ml/min	15 ml/min	20 ml/min	40 ml/min
0,05	10194,75 Pa	20417,87 Pa	30669,95 Pa	40950,86 Pa	82361,38 Pa
0,10	1185,70 Pa	2375,07 Pa	3567,66 Pa	4763,94 Pa	9583,11 Pa
0,15	325,72 Pa	652,14 Pa	979,70 Pa	1308,06 Pa	2632,28 Pa
0,20	126,78 Pa	253,73 Pa	381,09 Pa	508,96 Pa	1024,77 Pa
0,25	59,46 Pa	119,32 Pa	179,15 Pa	239,16 Pa	481,61 Pa
0,30	31,44 Pa	62,9 Pa	94,61 Pa	126,38 Pa	254,45 Pa

Foram realizados pré-testes no sistema reacional real, os quais apontaram perdas de carga superiores a 200 Pa. Os valores de perda de carga dos leitos simulados com 100 e 1000 partículas se apresentaram, em sua maioria, inferiores a esse valor, podendo ser desconsiderados da análise.

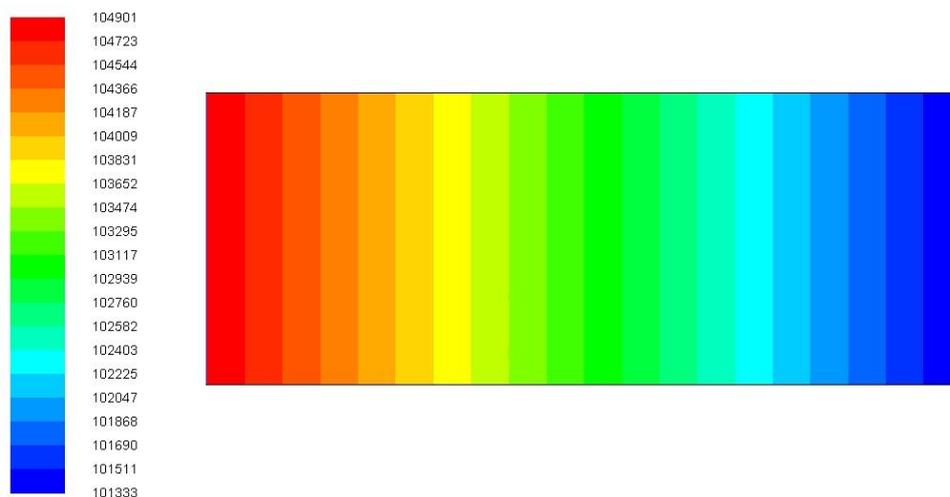
Analisando graficamente os resultados obtidos quando comparados os valores de perda de carga em função da velocidade do escoamento é possível perceber um comportamento estritamente laminar, já que os dados se relacionam linearmente. Esse fato foi observado em todos os conjuntos de simulações realizadas, exemplificado abaixo na Figura 3 pela simulação numa porosidade de 10% para a quantidade de 100000 partículas.

Figura 3 – Variação de pressão versus vazão no leito de 100000 partículas



Além dos valores numéricos apresentados pelas simulações realizadas, pôde-se ainda verificar o comportamento dos perfis de pressão e da velocidade para cada tipo de escoamento proposto. A Figura 4 apresenta o perfil de variação de pressão ao longo do meio poroso. Essa se trata da simulação do leito de 100000 partículas e porosidade de 0,1 na vazão de escoamento de 15 ml/min, entretanto todas as simulações obtiveram um perfil de pressão semelhante a esse.

Figura 4 – Perfil de pressão do leito poroso



Como o método de análise utilizado foi o de meio pseudo-homogêneo, na simulação não ocorrem escoamentos preferenciais e perdas de cargas locais por consequência disso. Dessa maneira, a variação de pressão é bem distribuída ao longo de todo o leito, não havendo gradientes de pressão ao longo do eixo vertical.

A análise do perfil de velocidade evidencia que o escoamento simulado ocorre predominantemente na velocidade máxima, sendo que o efeito das paredes é pouco evidente e afeta somente uma região muito próxima às extremidades verticais do escoamento.

O teste de malha verificou uma diferença inferior a 1% para todas as simulações, evidenciando assim que a malha não influenciou nos resultados obtidos.

2. Simulações das tubulações

Os principais resultados obtidos da simulação do escoamento pelas tubulações que ligam os medidores de pressão além do escoamento no interior do reator sem meio poroso se encontram na Tabela 3, abaixo:

Tabela 2 – Perda de carga simulada para o sistema de tubulações e interior do reator.

Vazão (ml/min)	Perda de carga (Pa)
5	7,46
12	19,74
19	33,64
26	49,00
33	65,81
40	83,5

Quando comparados com os valores das perdas de carga relacionadas à pedra rochosa, é de se esperar que as perdas de carga do sistema de tubulações representem apenas uma pequena parcela da perda de carga total do escoamento. Esse pequeno valor observado se deve ao fato de que as velocidades alcançadas no interior da tubulação são todas inferiores a 0,1 m/s.

O teste de malha verificou uma diferença inferior a 2% para todas as simulações, evidenciando assim que a malha pouco influenciou nos resultados obtidos.

3. Simulações da temperatura

A divisão da simulação do comportamento da temperatura no sistema em duas etapas foi feita para evitar problemas de ponto flutuante na resolução do problema. Os principais dados da primeira etapa, que consistiu na simulação da temperatura nas tubulações quando havia escoamento submetido a um aquecimento externo, se encontram abaixo na Tabela 3. A temperatura apresentada é a temperatura na saída da tubulação ou entrada do reator, sendo que a temperatura inicial nas simulações é de 298,15K (25°C) e a temperatura externa é de 353,15K (80°C).

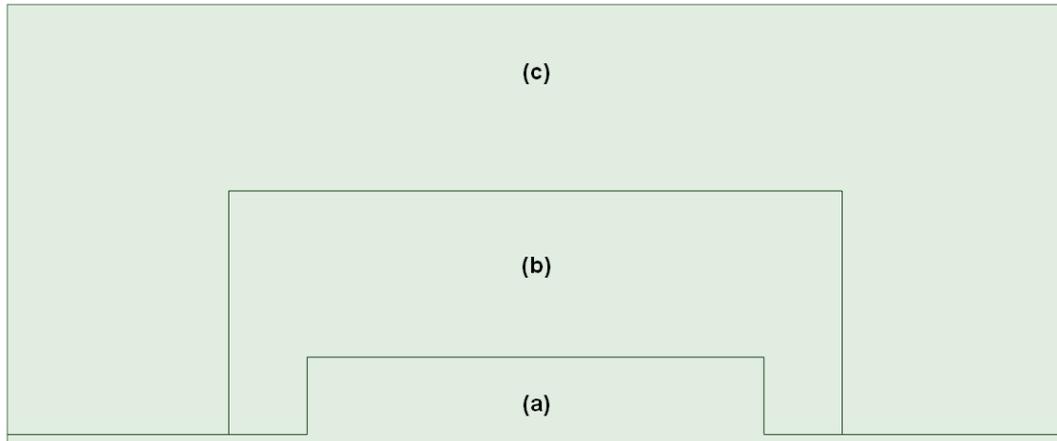
Tabela 3 – Temperatura simulada para a entrada do reator sob temperatura externa de 353,15K.

Vazão (ml/min)	Temperatura (K)
5	353,13
10	352,98
15	352,48
20	351,60
40	345,88

É seguro afirmar, através dos resultados obtidos, que a operação do sistema com o escoamento ocorrendo a vazões iguais ou inferiores a 20 ml/min a entrada de água no reator terá uma temperatura suficientemente igual à temperatura de operação. A vazões elevadas, como é observado a 40 ml/min, a temperatura média se distancia consideravelmente da temperatura do banho.

A segunda etapa, realizada de modo a se obter a temperatura média no interior do porta amostra de nylon na região onde ocorre o escoamento, foi realizada em regime transiente e os dados foram extraídos ao longo da extensão do interior do porta amostra. A Figura 7, abaixo, apresenta a geometria utilizada para a simulação, sendo que a região (a) é a região vazia onde ocorre o escoamento e será posicionada a rocha porosa, a região (b) é a porta amostra de nylon e a região (c) é a casca do reator.

Figura 5 – Geometria da simulação do sistema do reator.



A simulação foi realizada considerando a linha inferior da geometria como uma simetria, ou seja, os cálculos são feitos levando em conta que toda a parte superior a essa linha é refletida para baixo.

As figuras 8, 9 e 10 apresentam os perfis de temperatura simulados para a vazão de 20 ml/min e a uma temperatura de 80°C, para os tempos de dois minutos, vinte minutos e uma hora, respectivamente.

Figura 6 – Perfil de temperatura após 2 minutos de escoamento (298K a 353,15K).

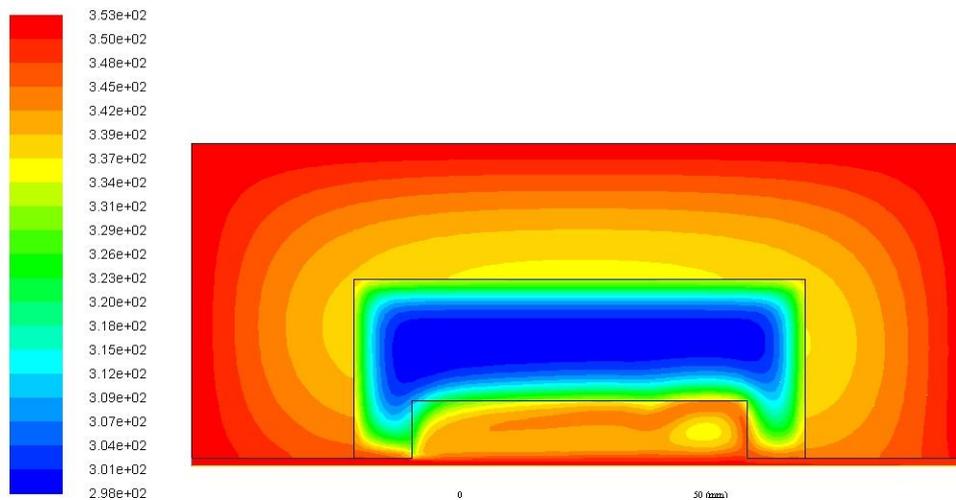


Figura 7 - Perfil de temperatura após 20 minutos de escoamento (346,80K a 353,15K).

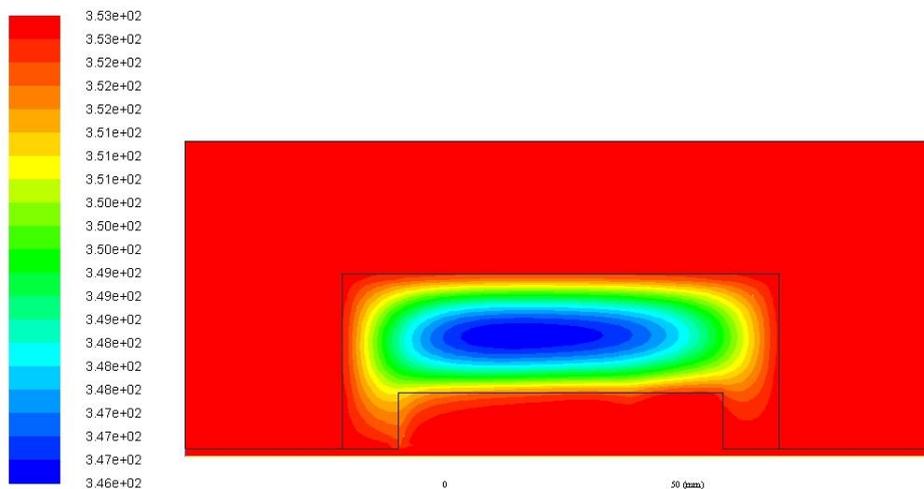
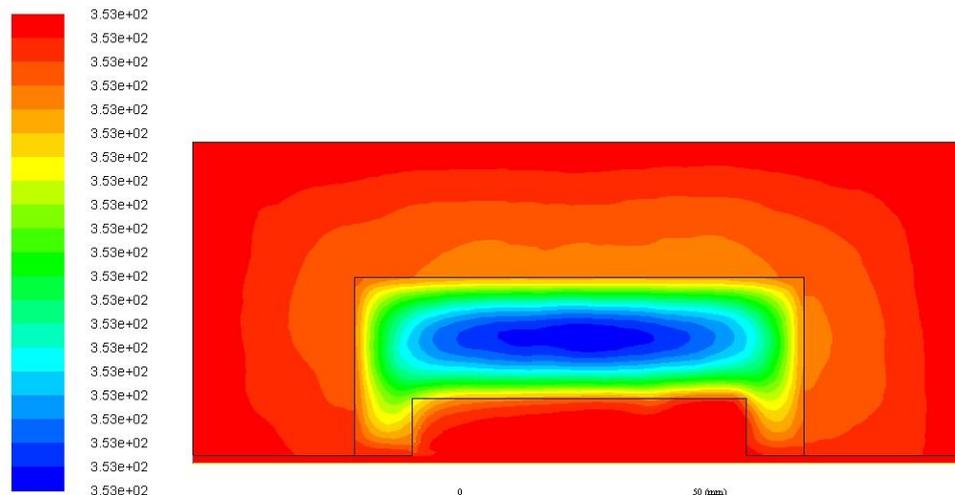


Figura 8 - Perfil de temperatura após uma hora de escoamento (353,05K a 353,15K).



Analisando os resultados obtidos e a temperatura média dentro da cápsula de nylon com o passar do tempo, é possível afirmar que, caso a vazão seja superior a 15 ml/min, o escoamento se comporta isotermicamente a partir de 20 minutos. Antes disso a temperatura do nylon é suficientemente baixa para interferir na temperatura da vazão de água, sendo que o contraste de temperatura se deve grandemente ao fato de que o nylon possui uma baixa condutividade térmica, levando assim mais tempo para atingir temperaturas elevadas.

Os testes de malha realizados apontaram um erro relativo de menos de 2% para as simulações realizadas com uma malha de melhor qualidade, evidenciando assim que a quantidade de elementos não influenciou nos resultados.

Conclusão

Todas as simulações necessárias para análise de compatibilidade da modelagem do sistema foram realizadas e apresentaram resultados satisfatórios e condizentes com o esperado. Dessa maneira, a próxima etapa da pesquisa poderá prosseguir como esperado e os dados experimentais e simulados poderão ser comparados para validar o modelo.

Referências

1. C. F. Lucchesi. Petróleo. Estudos Avançados. 1998, Vol. 12, p. 17-40.
2. H. Ott; K. de Kloe; M. van Bakel; F. Vos; A. van Pelt; P. Legerstee; A. Bauer; K. Eide; A. van der Linden; S. Berg; A. Makurat. Core-flood experiment for transport of reactive fluids in rocks. Review of Scientific Instruments. 2012, Vol. 83.
3. M. Blunt; F. J. Fayers; F. M. Orr Jr. Carbon dioxide in enhanced oil recovery. Energy Convers. 1993, Vol 34, p. 1197-1204.
4. M. W. Saaltink; V. Vilarrasa; F. D. Gaspari. A method for incorporating equilibrium chemical reactions into multiphase flow models for CO₂ storage. Advances in Water Resources. 2013, Vol. 62, p. 431-441.
5. ANSYS Student, version 19.1. ANSYS, Inc., 2008.