



Lucas Monteiro Renault Milo

**Simulações numéricas de deslocamentos
axissimétricos entre fluidos miscíveis em
espaços anulares.**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC–Rio.

Orientador: Rafael Menezes de Oliveira

Rio de Janeiro
Dezembro de 2022

Agradecimentos

Eu gostaria de expressar minha gratidão a minha família, em especial à minha mãe, Mirela, meu pai, Rodrigo, e meu irmão, Caio, que sempre me apoiaram e estiveram do meu lado em todos os momentos. Muito obrigado pela ajuda, incentivo e investimento durante todos estes anos. Vocês são minhas principais referências para vida.

Agradeço a Pontifica Universidade Católica por todos esses anos de aprendizado, oferecendo a oportunidade de aprender com excelentes professores e profissionais, além de sua estrutura extremamente satisfatória. Guardarei para sempre a lembrança dessa faculdade e das pessoas que cruzaram o meu caminho nesse local.

Agradeço ao professor Rafael Oliveira, por todo o apoio que sempre foi me dado. Extremamente atencioso, sempre disponível para auxiliar e tirar dúvidas. Agradeço de coração a oportunidade que me deu de ser orientado pelo próprio nesse projeto tão importante para mim. Espero de verdade ter outras oportunidades de trabalhar com o senhor e poder me desenvolver. Obrigado Rafael!

Resumo

Simulações numéricas de deslocamentos axissimétricos entre fluidos miscíveis em espaços anulares.

A simulação numérica se caracteriza por projetar um modelo computacional de um caso real. A partir desse modelo é possível realizar experimentos e simulações, com o propósito de compreender o comportamento daquela situação projetada. Na indústria do petróleo, a cimentação tem a função de isolar as zonas existentes no poço, fornecer suporte adequado para o revestimento e evitar que fluidos se migrem. A cimentação é uma das operações mais críticas no processo de perfuração e completação de poços de petróleo, uma vez que está diretamente relacionada à segurança do próprio poço. Para que as operações de cimentação sejam bem-sucedidas, a pasta de cimento precisa deslocar o fluido de perfuração completamente. Esse deslocamento ocorre no espaço anular entre o revestimento do poço e a formação rochosa. O objetivo de nossa proposta passa por compreender o comportamento do fluido nesse processo de cimentação. Motivados por esses processos industriais, conduziremos simulações numéricas diretas do processo de deslocamento entre fluidos miscíveis em espaços anulares. Nesses deslocamentos axissimétricos, propomos investigar como diversos efeitos físicos afetam a eficiência do deslocamento, incluindo as diferentes viscosidades e densidades entre os fluidos injetado e deslocado, a miscibilidade entre eles, a taxa de injeção e a abertura do espaço anular. Para isso, será utilizado um código número baseado em diferenças finitas e métodos espectrais, escrito em linguagem C, que fornecerá dados para analisar o comportamento dos fluidos. A leitura desses dados e a visualização do escoamento bifásico serão feitos no software Matlab.

Palavras-chave

Simulações Numéricas, Deslocamento de Fluidos, Escoamento em anular, Processo de Cimentação de poços, Indústria de Óleo & Gás,

Abstract

Numerical simulations of axisymmetric displacements between miscible fluids in annular spaces.

Numerical simulation is characterized by designing a computational model of a real case. From this model it is possible to carry out experiments and simulations, with the purpose of understanding the behavior of that projected situation. In the oil industry, cementing has the function of isolating the existing zones in the well, providing adequate support for the casing and preventing fluids from migrating. Cementing is one of the most critical operations in the process of drilling and well completion oil wells, as it is directly related to the safety of the well itself. For successful cementing operations, the cement paste needs to displace the drilling fluid completely. This displacement occurs in the annular space between the well casing and the rock formation. The objective of our proposal is to understand the behavior of the fluid in this cementing process. Motivated by these industrial processes, we will conduct direct numerical simulations of the displacement process between miscible fluids in annular spaces. In these axisymmetric displacements, we propose to investigate how different physical effects affect displacement efficiency, including different viscosities and densities between injected and displaced fluids, miscibility between them, injection rate and annular space opening. For this, a numerical code based on finite differences and spectral methods will be used, written in C language, which will provide data to analyze the behavior of fluids. The reading of these data and the visualization of the two-phase flow will be done in the Matlab software.

Keywords

Numerical Simulations, Annular Spaces, Wells Cementation Process, Oil & Gas Industry,

Sumário

| | | |
|---|-------------|----|
| 1 | Introdução | 8 |
| 2 | Metodologia | 13 |
| 3 | Resultados | 18 |
| 4 | Conclusão | 34 |

Lista de figuras

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Processo de Perfuração de um Poço até a sua cimentação. [1] | 9 |
| 1.2 | Problemas recorrentes na cimentação. [2] | 10 |
| 1.3 | Vista de um exemplo da curvatura da geometria anular e suas interfaces. [2] | 11 |
| 2.1 | Perfil de deslocamento do fluido de trabalho com os campos de concentração $c = 0.1, 0.5$ e 0.9 . | 14 |
| 2.2 | Perfil da concentração com o tempo, com os seguintes parâmetros: $M = 3$; $Re = 100$, $Pe = 1000$ e $c = 0.5$. | 16 |
| 3.1 | Análise do passo de tempo da solução. | 18 |
| 3.2 | Análise do erro em porcentagem de cada passo de tempo. | 19 |
| 3.3 | Análise do refinamento da malha na solução. | 20 |
| 3.4 | Análise do erro em porcentagem de acordo com a variação dos pontos por comprimento na direção radial. | 21 |
| 3.5 | Análise da concentração média ao longo da direção axial, com os parâmetros $M = 3$; $Re = 100$ e $Pe = 1000$. | 22 |
| 3.6 | Análise da concentração média ao longo da direção axial, para diferentes números de Reynolds. | 23 |
| 3.7 | Comportamento do fluido com número de Reynolds igual a 1000, com os valores de $c = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ e 0.9 . | 24 |
| 3.8 | Comportamento do fluido com $Re = 1000$, com os valores preenchidos do campo da concentração $c = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ e 0.9 . | 25 |
| 3.9 | Comportamento do fluido com $Re = 1000$, com os valores preenchidos do campo da concentração $c = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ e 0.9 e o campo da velocidade. | 25 |
| 3.10 | Comportamento do fluido com $Re = 1000$, com os valores preenchidos do campo da concentração $c = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ e 0.9 e algumas linhas de corrente. | 26 |
| 3.11 | Comparação das interfaces dos campos de concentração entre A) $Re = 1000$ e B) $Re = 100$. | 27 |
| 3.12 | Análise da concentração média ao longo da direção axial, para diferentes números de Péclet. | 27 |
| 3.13 | Análise dos contornos com valores do campo de concentração $c = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$, em $t = 1$ e 4 (A) $Pe = 500$ (B) $Pe = 1000$ (C) $Pe = 2000$ | 28 |
| 3.14 | Comparação da concentração média para diferentes Valores de M (M igual o log da razão entre μ_2 e μ_1) | 29 |
| 3.15 | Comparação entre as razões de viscosidade do comportamento dos fluidos com a concentração fixada em $0,5$. | 29 |
| 3.16 | Comparação da densidade na direção axial | 30 |
| 3.17 | Contorno $c = 0.5$ do campo de concentração para diferentes valores de F e $t = 1.09$ | 31 |

| | | |
|------|--|----|
| 3.18 | Análise da concentração ao longo do eixo axial, variando a abertura anular | 32 |
| 3.19 | Análise do contorno do campo de concentração dos valores de $c = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ e 0.9 em $t = 2$, de acordo com a variação do Raio interno | 33 |

1

Introdução

A indústria do petróleo tem uma grande importância para o mercado energético mundial, sem a exploração do petróleo teríamos uma grande crise energética mundial. Dentre esse contexto, a indústria do petróleo tem grandes objetivos como identificar as jazidas existentes, localizar com precisão os reservatórios, realizar a exploração e perfuração do poço, com eficiência, segurança operacional e ambiental.

Existem três processos muito importantes durante a construção e desenvolvimento de um poço de petróleo que são a perfuração, a introdução da tubulação de revestimento e a cimentação.

A perfuração é um processo feito por uma sonda de perfuração a partir da superfície da crosta, a operação carrega consigo uma grande complexidade, que necessita cuidados importantes, uma delas é equiparar as pressões no processo. Uma das soluções encontradas para isto é diminuir o diâmetro da tubulação à medida que se atinge profundidades maiores.

Antes da retirada da coluna de perfuração, é necessário realizar a remoção de cascalhos derivados e produzidos pela perfuração. Para isso é injetado um fluido no interior da coluna, retornando à superfície através do espaço anular formado pelas paredes do poço e a coluna. A partir daí, um outro processo se inicia, chamado de completação, que estabiliza o cilindro perfurado através da colocação de revestimento e cimentação do espaço anular.

A cimentação tem como principal função de isolar as zonas existentes no poço, fornecendo um suporte adequado para o revestimento, e evitar que fluidos se migrem. O processo de cimentação consiste em bombear esse fluido, normalmente composto de água, cimento e aditivos, para o espaço anular que é formado entre as paredes externas do revestimento e as paredes da formação perfurada. Abaixo é possível ver uma imagem que exemplifica bem todo esse processo.

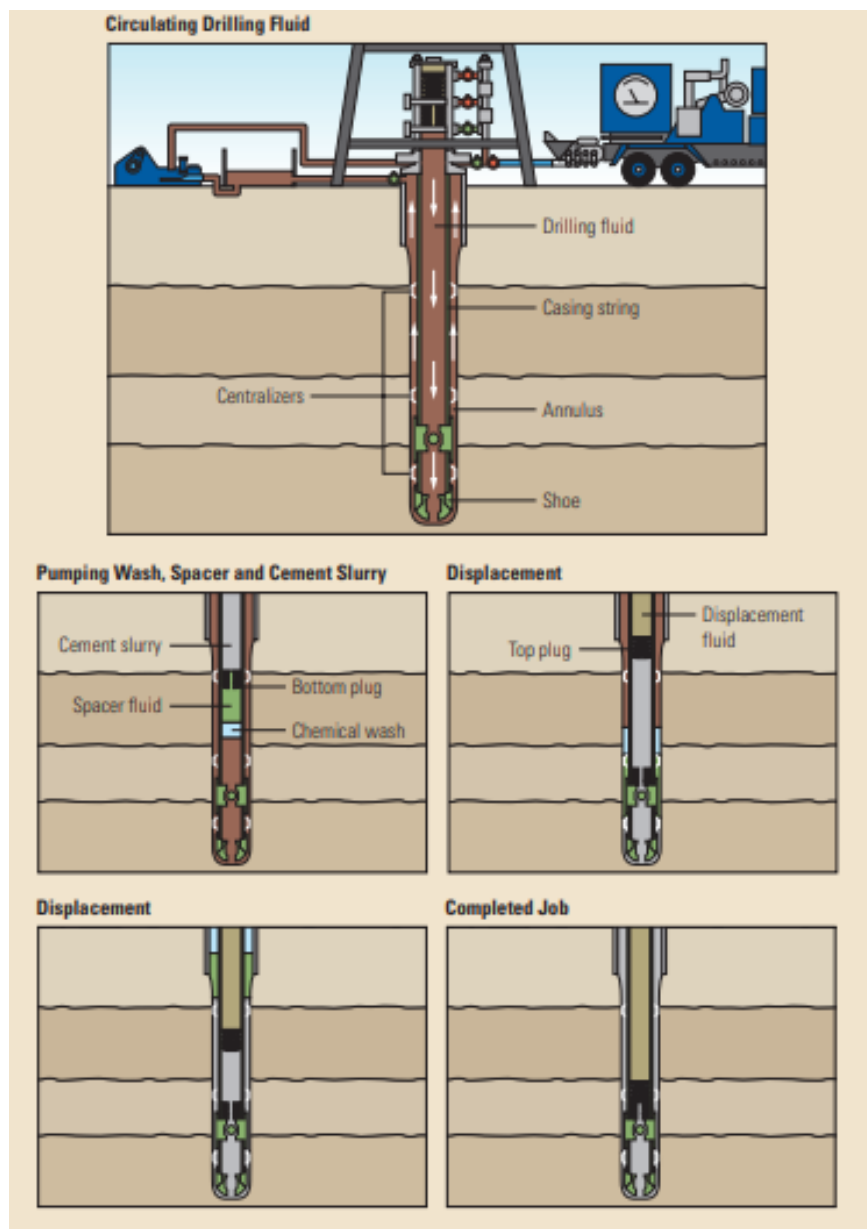


Figura 1.1: Processo de Perfuração de um Poço até a sua cimentação. [1]

A preocupação com o meio ambiente é uma grande questão nesse processo que envolve a perfuração até cimentação de poços. Neste contexto, as empresas estão cada vez mais investindo em segurança e tecnologias não poluentes. Com isso, é possível perceber que a indústria de petróleo como um todo vem buscando cada vez mais evitar situações como derramamento de óleo em oceanos e terras, acidentes e poluição. Uma das formas de evitar justamente essa poluição por vazamento é realizar o estudo dos deslocamentos de fluidos no processo de cimentação. Sendo importante e muito utilizado na indústria de óleo e gás, justamente para evitar problemas como da imagem a seguir em processos de cimentação.

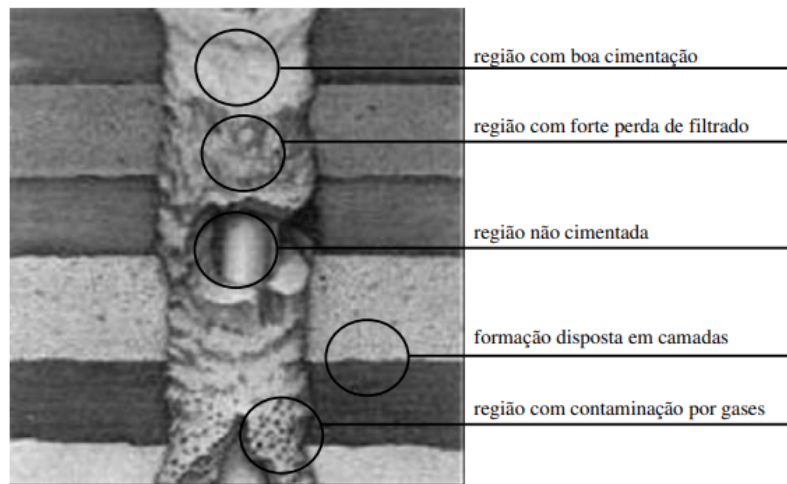


Figura 1.2: Problemas recorrentes na cimentação. [2]

A motivação do estudo tem a intenção de compreender esses diversos fatores que influenciam o processo, como: pressão, temperatura, migração das substâncias e seus movimentos, composição dos fluidos que participam, entre outros fatores. No contexto de produção e abandono de poços, a cimentação do revestimento do poço é um importante fator para prevenir vazamento de fluidos. Uma dessas irregularidades são os chamados washouts, que contêm erosão da formação rochosa e consequentemente ampliação da região anular [3]. Dentro desse contexto, [4] realizaram simulações não lineares do deslocamento vertical de um fluido de Bingham. O fluido newtoniano injetado é mais denso, de modo que o deslocamento ascendente é densamente estável. Os autores apresentam este deslocamento cartesiano como um modelo simples para investigar deslocamentos em micro anulares com aplicações na cimentação primária. Entretanto efeitos da curvatura do espaço anular são negligenciados. Com a intenção de investigar experimentalmente deslocamentos importantes para operações de tampão e abandono (P&A) de poços, Akbarai e Taghavi (2021) [5] injetaram fluidos newtonianos para deslocar um segundo fluido menos denso em poços inclinados. Eles analisaram a configuração de deslocamentos descendentes e verificaram que o deslocamento do fluido menos denso é mais eficiente quando o comprimento da tubulação é relativamente curto.

No geral, os deslocamentos entre fluidos em tubos cilíndricos ou espaços anulares é influenciado pela reologia de ambos os fluidos, suas densidades, taxa de injeção e geometria do local de escoamento. Em nossas simulações, incorporamos esses efeitos, incluindo a curvatura da geometria anular. Isso permite a investigação de deslocamento em poços e anulares de diâmetros distintos.

A figura 1.3 é um corte de uma divisão anular, e exemplifica bem suas características, ajudando a compreender o processo.

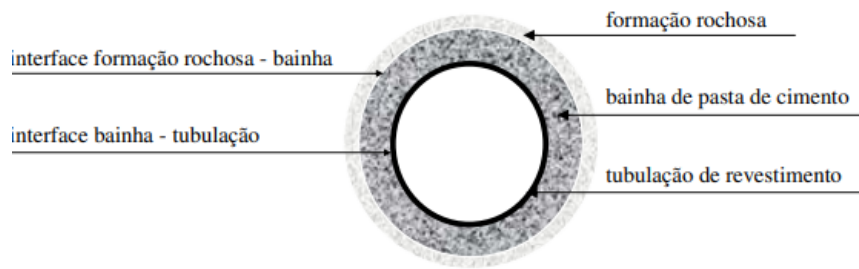


Figura 2. Divisões do anular e suas interfaces.

Figura 1.3: Vista de um exemplo da curvatura da geometria anular e suas interfaces. [2]

Dentro desse contexto de vazamento em poços e as preocupações, R. Zhang and I.A. Frigaard (2022) [6] traz algumas informações interessantes. Primeiro, o vazamento de gás normalmente é CH_4 e H_2S , sendo esse último um gás que tem consequências sérias para a saúde. Reservatórios de estocagem de CO_2 também geram preocupação quanto seus vazamentos. Alguns dados interessante encontrados em Trudel et al (2019) [7] mostram que 28,5% dos reservatórios perfurados de 2010 até 2018 em British Columbia no Canadá, apresentaram vazamento pelo revestimento da superfície, conhecido na indústria pela abreviatura de SCVF (*surface casing vent flow*). Como em Baillie et al. (2019), que apresenta uma emissão de gás em aproximadamente 28%-32% dos campos em *Southeastern Saskatchewan*, Canadá. Esses dados só demonstram a importância de desenvolver pesquisas e debates sobre a cimentação de poços.

O uso de simuladores numéricos com linguagem de programação vem sendo bastante utilizado para estudo na indústria de petróleo. S. Ribeiro e MF Naccache (2022) [8] utilizam a linguagem de programação Python para obter um modelo numérico de elementos finitos que analisa o processo de cura de cimento de um poço de petróleo. O simulador do nosso grupo de pesquisa foi implementado em linguagem C usando técnicas de diferenças finitas e métodos espectrais (Kim e Moin, 1985 [9], Rai e Moin, 1991[10]) através de uma metodologia híbrida que combina o método explícito de Runge-Kutta (RK) para os termos convectivos com o método implícito de Crank-Nicolson para termos viscosos (Oliveira e Meiburg, 2011). Vale ressaltar o uso do WENO (weighted essentially non-oscillatory), que é um de método de quinta ordem para os termos convectivos não lineares, o próprio Runge-Kutta para integração temporal e Crank-Nicolson para os termos viscosos. Enquanto os

métodos espectrais são usados para resolver uma equação de Poisson para obter o gradiente de pressão. Neste trabalho de conclusão, daremos ênfase nas diferentes viscosidades e densidades a serem usadas entre o fluido de injeção e o fluido de deslocamento, a miscibilidade entre eles, a taxa de injeção e a abertura do espaço anular.

2

Metodologia

Para uma maior facilidade na compreensão dos processos, o projeto é separado em fases, que serão seguidas a partir de agora, exemplificando a metodologia de trabalho. Primeiro, será apresentado o problema físico do projeto, mostrando a geometria de trabalho, além das principais equações envolvidas, com as condições de contorno e iniciais. Em seguida, será aprofundado sobre os métodos numéricos, e todo o trabalho de convergência de malha.

A ordem mais natural de apresentação é começar falando do problema físico mostrando uma figura esquemática da geometria de trabalho, e listando as equações de movimento, condições de contorno e condições iniciais. Aqui, exemplificamos as duas equações de Navier-Stokes, para v_z e v_r e a equação para o campo de concentração do fluido deslocado, c . Assim definimos uma seção do trabalho. Em seguida, apresentamos os métodos numéricos e depois falamos do estudo de convergência da malha. Neste ponto, utilizamos gráficos que confirmem o que argumentamos no texto, demonstrando toda a análise numérica. A etapa seguinte é a discussão de resultados obtidos a partir de uma investigação paramétrica variando Re , Pe , F , e M , que será abordado no capítulo relacionado aos resultados.

2.0.1

Problema Físico

Os dois parâmetros citados no primeiro parágrafo da seção 2, passo de tempo Δt , e pontos por unidade de comprimento na direção y , N_y , servem para realizar estudos de passo de tempo e da malha numérica. A convergência das soluções numéricas ao refinar esses parâmetros é um bom indicativo da acurácia dos métodos propostos. Sendo necessário de se verificar em todo tipo de simulação numérica. A geometria trabalhada é axissimétrica. Então, estamos trabalhando com as variáveis r e z , distâncias radial e axial, respectivamente. Assim, utilizaremos as seguintes variáveis d_r , d_z , N_r e N_z .

A figura 2.1 mostra uma representação esquemática do problema a ser investigado, com as condições de contorno e condições iniciais. Importante notar que a geometria é axissimétrica. Este perfil envolve um plano em 2 dimensões, na direção radial e axial, além de não deslizamentos nos raios internos e externos. A seguir é possível ver os dados de entrada, com uma velocidade média do fluido injetado igual a U , viscosidade injetada μ_1 e a concentração c , a concentração do fluido injetado é igual a 0. Já na parte final

do escoamento, a concentração do fluido é igual a 1, sendo o local onde o fluido residente está presente.

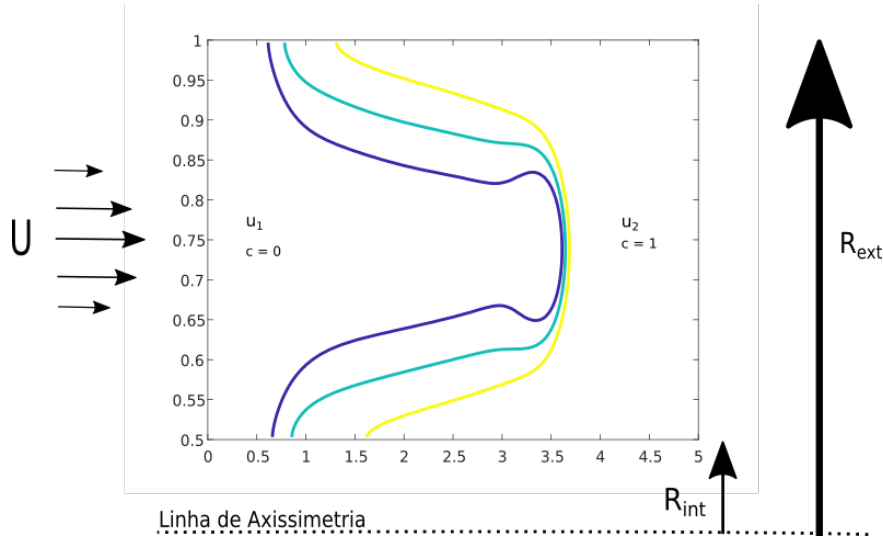


Figura 2.1: Perfil de deslocamento do fluido de trabalho com os campos de concentração $c = 0.1, 0.5$ e 0.9 .

Na figura 2.1, é possível identificar também os Raios externos R_{ext} e o raio interno R_{int} , a diferença destes raios caracteriza o espaço anular, sendo justamente o local de trabalho do fluido que está sendo analisado. Além de exemplificar a difusidade da interface de trabalho, com a concentração variando de $0 < c < 1$.

Antes de começar a modelagem do problema, é conhecido que parâmetros como a viscosidade, densidade, injeção de fluidos, entre outros exemplos, geram efeitos no escoamento. Neste contexto, passa por compreender quais características tem esses efeitos no deslocamento de fluidos. A pesquisa foi definida em coordenadas cilíndricas, com isso iremos apresentar as equações da continuidade e a equação de Navier Stokes em coordenadas cilíndricas. Como a geometria de trabalho é axissimétrica, teremos apenas as variáveis r e z , distâncias radial e axial respectivamente. As equações abaixo são a base do problema físico, sendo a equação da continuidade, as equações de Navier Stokes nas componentes radial e axial, e a concentração do deslocamento de fluido. Vale lembrar que esse sistema de equações diferenciais parciais acoplado precisa ser resolvido para se obter as componentes radial e axial do campo de velocidade, o campo escalar que representa a concentração do fluido mais viscoso e o campo de pressão.

$$\frac{\partial r v_r}{\partial r} + \frac{r \partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (2-1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} = \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial}{\partial r} \left[\mu \frac{\partial v_r}{\partial r} \right] \right. \\ \left. + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right] + \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial r} + Fc \right) \end{aligned} \quad (2-2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right] \right. \\ \left. + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial r} + Fc \right) \end{aligned} \quad (2-3)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v_r \frac{\partial c}{\partial r} + v_z \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{1}{Pe} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] \quad (2-4)$$

Nas equações apresentadas v , p , c representam as velocidades nas componentes r e z , pressão e concentração, respectivamente.

Um caso específico do trabalho é que usamos a equação de Navier-Stokes, que tem por prerrogativa fluidos com viscosidade e densidade constantes, num sistema em que ela é variável. Os dois fluidos considerados nos deslocamentos que investigamos são Newtonianos. Isso garante que a equação de Navier-Stokes seja válida. No entanto, aplicamos um modelo numérico de fluido único e resolvemos uma única equação de Navier-Stokes para descrever toda a dinâmica, em todo o domínio, que é preenchido por fluidos com viscosidades distintas. Para isso, é necessário definir um campo de viscosidade variável, dependente da concentração do fluido mais viscoso. A correlação existente entre os campos de viscosidade e concentração é dependente do parâmetro $M = \ln(\mu_2/\mu_1)$. Essa razão de viscosidade em escala log é um dos parâmetros adimensionais que controlam o escoamento.

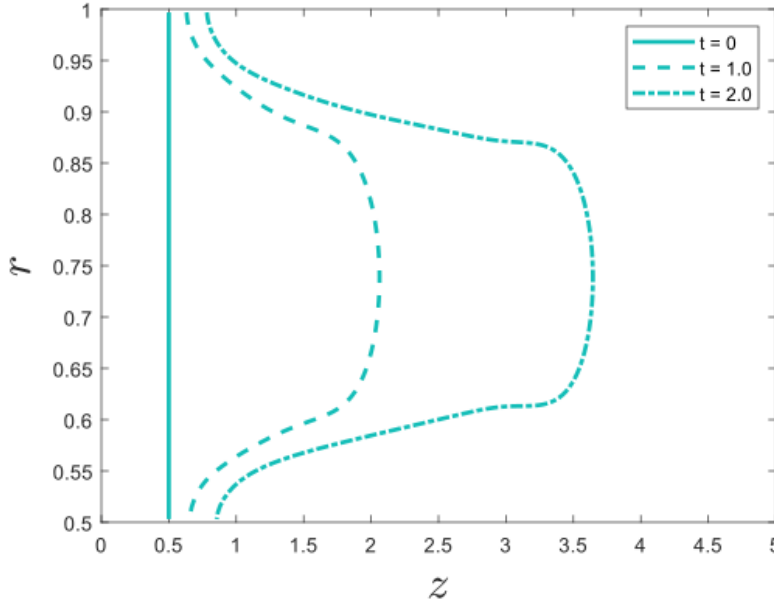


Figura 2.2: Perfil da concentração com o tempo, com os seguintes parâmetros: $M = 3$; $Re = 100$, $Pe = 1000$ e $c = 0.5$.

Na figura 2.2, plotamos o contorno $c = 0.5$ do campo de concentração para diferentes instantes de tempo. Esta imagem servirá como um parâmetro inicial para o desenvolvimento dos resultados, pois nos deu uma boa leitura do comportamento da concentração intermediária $c = 0.5$ ao longo do escoamento, em diferentes instantes de tempo.

Tendo em mente esses parâmetros iniciais, é importante analisar e compreender o que são. Existem 5 parâmetros físicos principais que irão governar nosso estudo, todos são adimensionais: número de Reynolds Re , força gravitacional F , o número de Peclet Pe , razão da viscosidade M e o raio interno/abertura anular R_i , sendo o resultado da razão entre o raio externo e interno. A abertura anular varia de 0 a 1. Quando R_i é igual a 0, estamos no limite de um tubo, ou seja, sem raio interno. Quando $R_i = 1$, o anular está completamente fechado, sendo a razão entre R_{ext} e o R_{int} que mede a abertura anular, como exemplificado anteriormente. Importante ressaltar a presença do coeficiente de difusão D na fórmula do número de Peclet.

Sendo:

$$Re = \frac{\rho_1 U R_{ext}}{\mu}, \quad F = \frac{\Delta \rho g_r R_{ext}^2}{\mu_1 U}, \quad Pe = \frac{U R_{ext}}{D}, \quad M = \ln \frac{\mu_2}{\mu_1}, \quad R_i = \frac{R_{ext}}{R_{int}} \quad (2-5)$$

O número de Reynolds serve como um parâmetro para identificar a vazão do fluido injetado. Já F define a razão entre efeitos gravitacionais e viscosos, também serve como medida do contraste da densidade entre os fluidos

envolvidos. O número de Peclet é medida importante relacionado a relação da advecção e a difusão que ocorre na interface entre os fluidos.

Para chegar ao objetivo desejado, iremos usar essa geometria e perfil de trabalho apresentado anteriormente para investigar como os diversos parâmetros físicos (Re , F , Pe , M e R_i) afetam as condições desses deslocamentos. Para isso, foi utilizado um código número baseado em diferenças finitas e métodos espectrais, escrito em linguagem C, que fornecerá dados para analisar o comportamento dos fluidos. Para realizar a leitura dos dados será utilizado o software Matlab. Com a análise dos gráficos obtidos pelo Matlab, conseguiremos compreender as diferenças encontradas. A nossa intenção é variar o maior número de parâmetros, inicialmente será trabalhado em cima desses dois parâmetros: passo de tempo (d_t) e número de pontos na malha (N_r e N_z).

O estudo do passo de tempo e refinamento da malha é importante para obtermos confiança de que estamos obtendo soluções numéricas com erro controlado, que convergem para a solução real das equações. Após essa análise, iremos fixar esses dois parâmetros com a melhor combinação de resultado obtido. A partir daí começaremos um novo processo de variação de parâmetros, variando o número de Reynolds Re , efeitos gravitacionais em deslocamentos verticais quando os fluidos têm densidades diferentes F , número de Péclet Pe e o raio interno/abertura anular.

3

Resultados

Utilizando o código numérico baseado em diferenças finitas e métodos espectrais, que foi escrito em C, iremos analisar o comportamento dos fluidos, sendo o principal objetivo desse capítulo. Para realizar a leitura desses gráficos foi utilizado o software *Matlab*.

Conforme já exemplificado, os principais parâmetros que serão alterados regularmente e analisados serão: Re , F , Pe , M e R_i . Esses parâmetros serão analisados pela concentração, pela velocidade axial, de acordo com tempos específicos, até conseguirmos obter um análise de funcionamento do deslocamentos de fluidos. Será sempre importante perceber semelhanças, diferenças, comportamentos não esperados, e a partir desse gráfico obter uma explicação física para o acontecimento.

Inicialmente, conforme exemplificado anteriormente, verificamos como o passo de tempo das soluções numéricas atinge o nosso trabalho. Para realizar essa análise, iremos verificar o comportamento da velocidade axial, v_{ztip} , do contorno $c = 0,5$ do local mais avançado da interface. Com isso, foi escolhido os seguintes valores para passo de tempo: $0,5 \times 10^{-4}$, 1×10^{-4} , 2×10^{-4} , 4×10^{-4} e 8×10^{-4} .

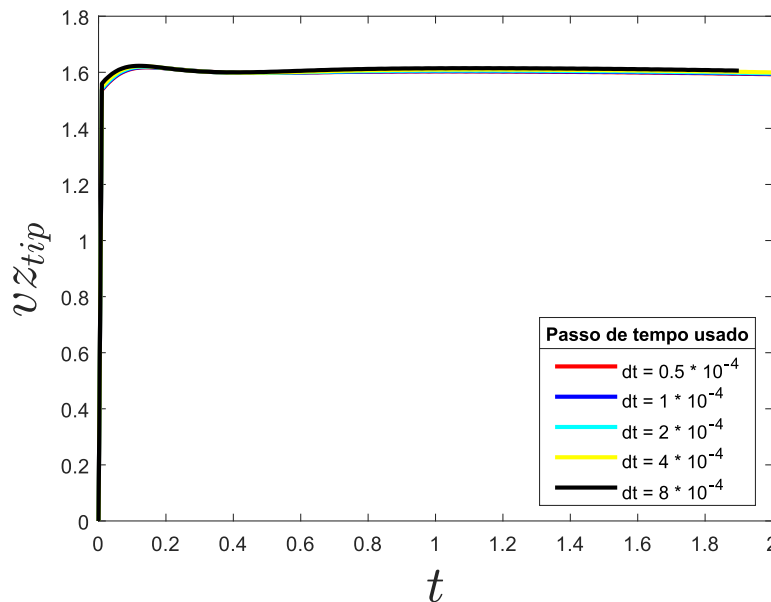


Figura 3.1: Análise do passo de tempo da solução.

A figura 3.1 nos dá clareza de que os passos de tempo têm um erro

extremamente controlado. Demonstrando que o gráfico após um transiente inicial, a frente da interface passa a se propagar com velocidade constante, atingindo um estado quase estacionário. Para confirmar isso e tirar qualquer dúvida, calculamos o erro em relação ao caso de menor passo de tempo, $dt = 0.5 \times 10^{-4}$ e realizamos a comparação com os valores quase estacionários da velocidade axial, $v_{z_{tip}}$. Obtendo o seguinte gráfico do erro em porcentagem pelo passo de tempo.

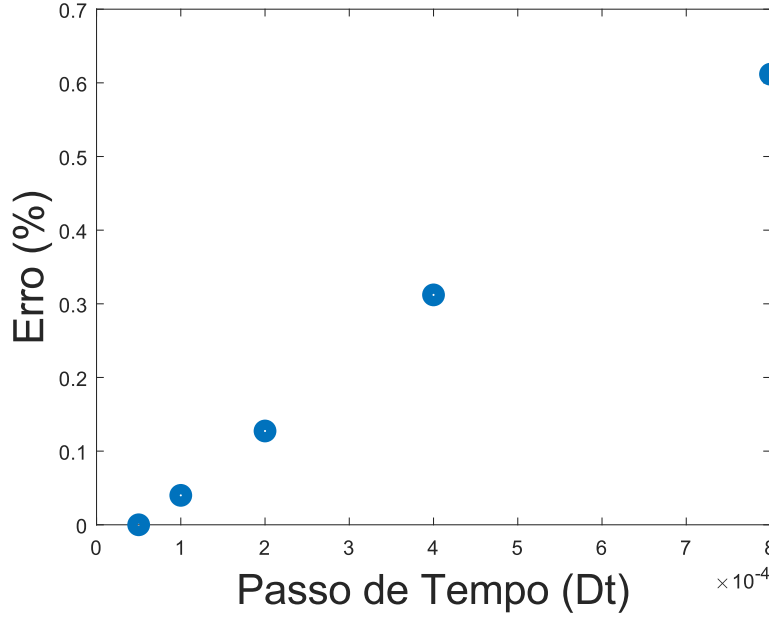


Figura 3.2: Análise do erro em porcentagem de cada passo de tempo.

A figura 3.2 nos dá segurança, pois o fato de ter um erro controlado em um caso com $M = 3$, $Re = 100$ e $Pe = 1000$, garante que quaisquer parâmetros inferiores serão bem capturados pelas simulações. Esse erro bem baixo também permite aumentar um pouco os valores utilizados nesses parâmetros, sem a necessidade de refazer um novo estudo de passo de tempo. Com isso, fixamos o valor do passo tempo em 1×10^{-4} .

De uma maneira geral, sabemos que um aumento significativo nos valores dos parâmetros de controle podem alterar o resultado apresentado. Um exemplo é que utilizando maiores valores dos números de Reynolds, de Péclet e da razão da viscosidade fazem com que os gradientes do escoamento se acentuem. Então maiores valores desses parâmetros exigem um maior número de pontos por comprimento na discretização numérica, que por sua vez exige menores passos de tempo.

A seguir iremos investigar como o refinamento de malha atinge nossa solução numérica. O código padrão utiliza 80 pontos por unidade de compri-

mento. Note que em nosso código, a direção axial do anular varia de $X1 = 0$ até $X2 = 10$. Isso nos dá um comprimento total de 10, utilizando no código um refinamento na direção axial de $N_x = 800$, gerando uma malha retangular. Assim, iremos realizar a comparação do refinamento de malha na direção radial usando os valores de 60, 70, 80, 90 e 100 pontos por unidade de comprimento ao longo da direção radial. Com esses números, iremos investigar um total de pontos variando de 48.000 (mínimo) até 80.000 (máximo).

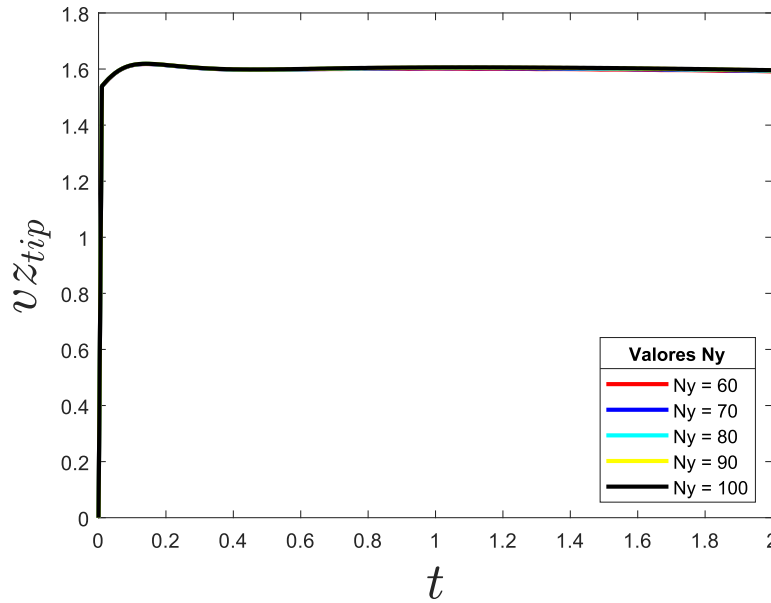


Figura 3.3: Análise do refinamento da malha na solução.

Na figura 3.3, seguindo a mesma linha de raciocínio do gráfico obtido na comparação do passo de tempo, a imagem do refinamento de malha nos mostra um erro controlado para nossa solução numérica. Novamente, será realizado o gráfico da análise do erro, para termos uma confirmação numérica do gráfico.

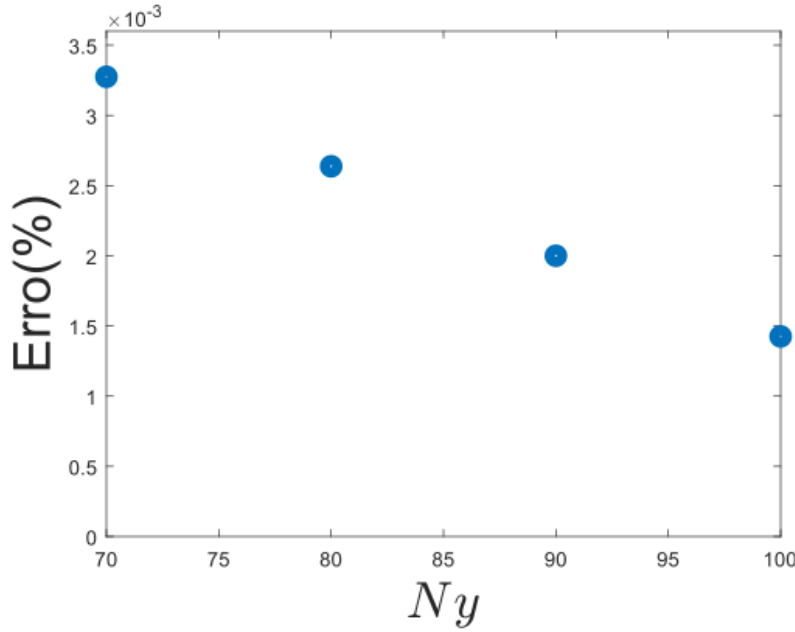


Figura 3.4: Análise do erro em porcentagem de acordo com a variação dos pontos por comprimento na direção radial.

A figura 3.4 mostra o maior refinamento de malha ($N_y = 100$) com o menor erro. Além de sinalizar um erro também muito bem controlado, visto que estamos falando de um erro na casa dos 10^{-3} . Com essas análises do passo de tempo e do refinamento da malha, conseguimos concluir que temos um erro controlado da nossa solução numérica. Com isso fixamos o passo de tempo em 1×10^{-4} e o refinamento de malha na direção radial de 80 pontos por unidade de comprimento. Isso viabiliza o projeto para realizar as análises paramétricas dos Re , F , Pe , M e R_i .

Nesse primeiro momento, focaremos na análise do número de Reynolds. A ideia é compreender, primeiramente, como funciona o perfil da concentração em diferentes momentos de tempo. Focamos em 3 principais tempos, com $t = 0$, $t = 1.0$ e $t = 2.0$. Conforme discutido nas imagens anteriores, em $t=2$, a interface entre os fluidos atinge um estado quase estacionário e passa a avançar com velocidade uniforme. Então este instante de tempo é bom para compararmos como os diversos parâmetros de controle afetam a forma da interface e a eficiência de deslocamento. O passo seguinte é compreender como a concentração média varia de acordo com a direção axial. A concentração média foi utilizada por nos fornecer maior rapidez para análise dos gráficos, além de obter gráficos melhores definidos, essa concentração foi obtida tirando uma média através da seção transversal.

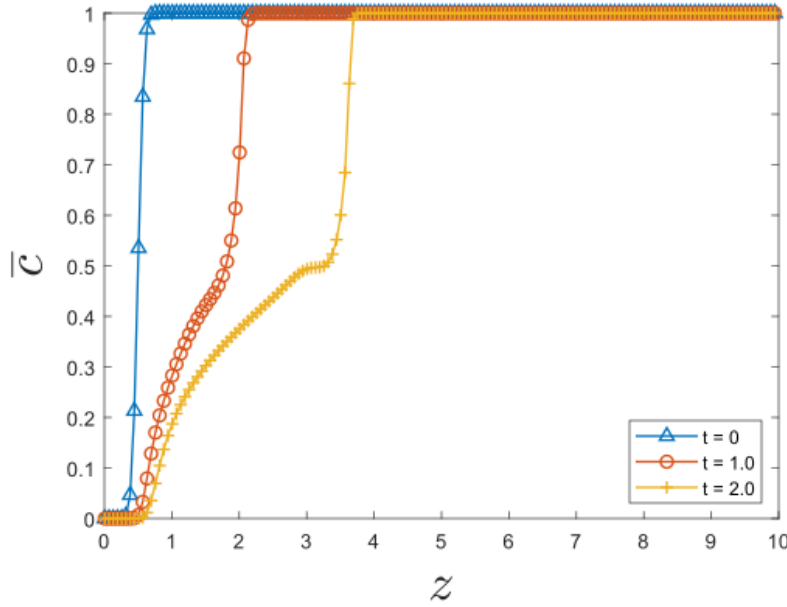


Figura 3.5: Análise da concentração média ao longo da direção axial, com os parâmetros $M = 3$; $Re = 100$ e $Pe = 1000$.

Na figura 3.5, é interessante notar que a concentração média no momento de $t = 0$ apresenta valores concentrados em $c = 0$ e $c = 1$ com uma rápida variação entre esses patamares. Esta transição está associada a natureza difusa da interface entre os fluidos. Olhando nessa perspectiva para os outros tempos, percebemos que a concentração apresenta uma densidade maior também entre 0 e 1, além de ter uma variação maior na direção axial, enquanto no momento de $t = 0$ temos pouca variação axial. Uma das justificativas de realizar a análise paramétrica é que ela contribui para identificar quais combinações de parâmetros resultam num menor comprimento de mistura e, consequentemente, numa melhor eficiência de deslocamento. Este comprimento de mistura dos fluidos nada mais é que a distância axial entre os valores $c = 0$ e $c = 1$.

Vale ressaltar como o perfil encontrado na Figura 3.5 está de acordo com o perfil desenhado na Figura 2.2. Conforme é demonstrado na figura 2.1, temos o fluido 1 com viscosidade μ_1 a esquerda e a viscosidade μ_2 aparecendo a direita.

Muito interessante notar e comprovar que os gráficos estão tendo relação entre si e apresentando perfis correspondentes. Isso nos dá uma segurança boa na pesquisa para continuar avançando. Continuaremos realizando a análise do número de Reynolds. O gráfico a seguir vai demonstrar o comportamento da concentração ao longo do deslocamento axial com diferentes Re .

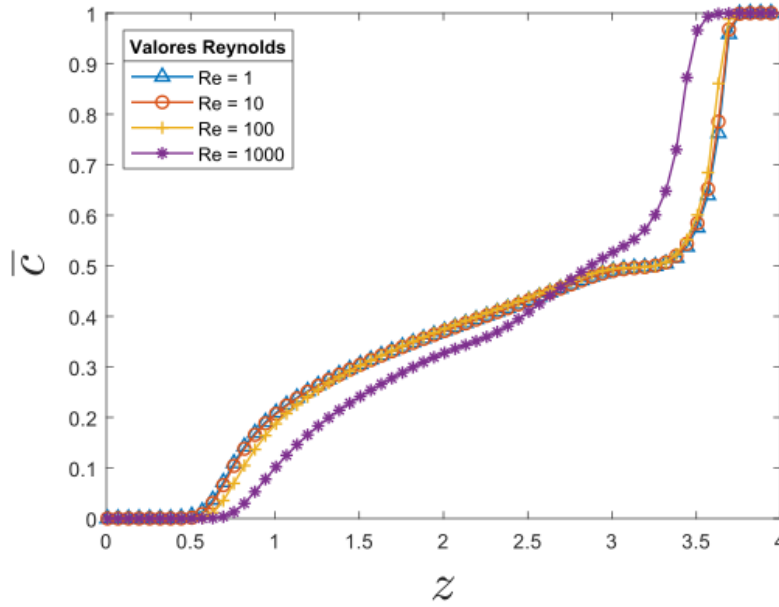


Figura 3.6: Análise da concentração média ao longo da direção axial, para diferentes números de Reynolds.

Sobre a figura 3.6, o que chama atenção é como vemos um perfil bem diferente dos demais em $Re = 1000$. Isso nos dá uma tendência de que números de Reynolds altos, nos fornecem comportamentos diferentes. Com isso, é interessante compreender melhor o comportamento especificamente desse número de Reynolds maior.

Com isso, vale a pena verificar a interface do fluido, com $Re = 1000$ e no momento em que $t = 2$.

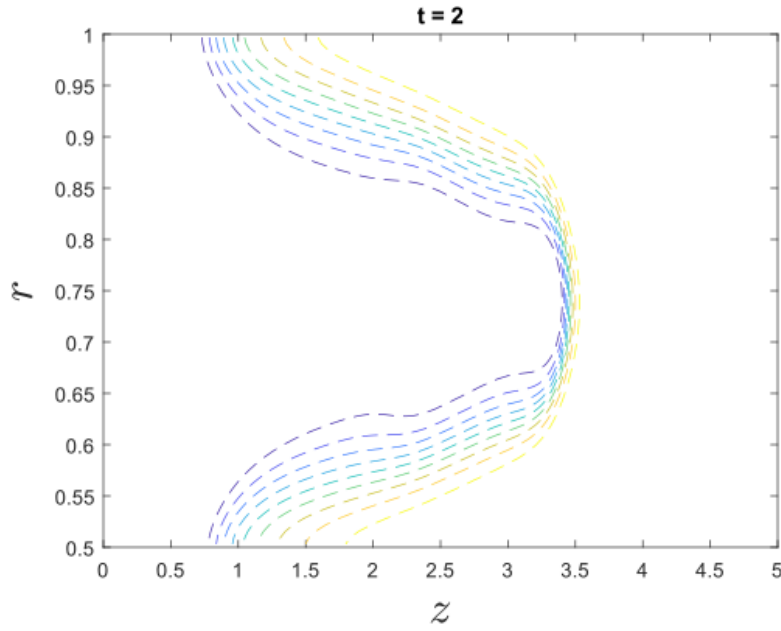


Figura 3.7: Comportamento do fluido com número de Reynolds igual a 1000, com os valores de $c = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ e 0.9 .

A figura 3.7 mostra o comportamento dos fluidos alterando de acordo com o aumento da concentração, conseguimos perceber isso comparando com a figura 2.2, principalmente nos pontos de $r = 0,6$ e $0,9$. Isso nos demonstra bem os efeitos do aumento do Reynolds em nosso perfil, isso se torna ainda mais perceptível, quando comparamos com o gráfico em que as interfaces dos campos de concentração são exaltadas com cores juntamente com o perfil em $t = 2$.

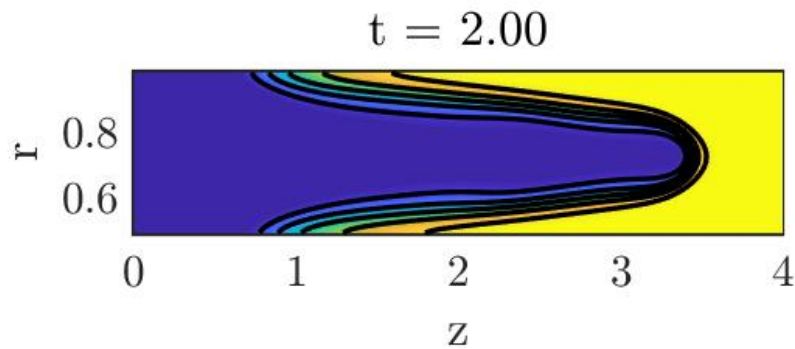


Figura 3.8: Comportamento do fluido com $Re = 1000$, com os valores preenchidos do campo da concentração $c = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ e 0.9 .

A figura 3.8, é similar a figura 3.7, só que demonstra os diferentes contornos da concentração, utilizando um tipo de gráfico em que os contornos são preenchidos.

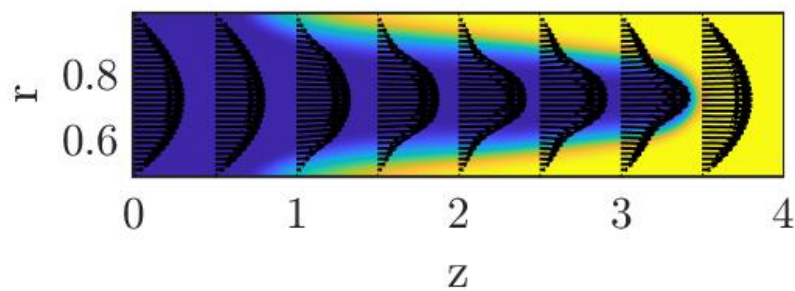


Figura 3.9: Comportamento do fluido com $Re = 1000$, com os valores preenchidos do campo da concentração $c = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ e 0.9 e o campo da velocidade.

Na figura 3.9, observamos as concentrações com diferentes cores, e as setas pretas representam o campo de velocidade no referencial euleriano. Analisando esse gráfico, percebemos uma aceleração do campo de velocidade dentro da interface obtida.

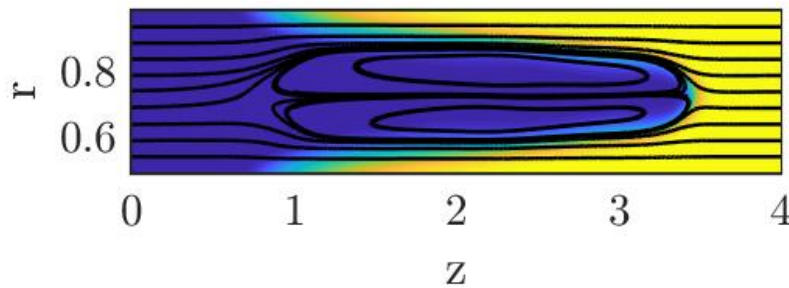


Figura 3.10: Comportamento do fluido com $Re = 1000$, com os valores preenchidos do campo da concentração $c = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ e 0.9 e algumas linhas de corrente.

Na figura 3.10, plotamos algumas linhas de corrente no referencial que se move com a frente da interface. É possível ver uma recirculação que dá fundamento a observação sobre o campo de velocidade. O contorno fechado localizado mais acima gira no sentido anti-horário, enquanto o contorno fechado mais abaixo gira no sentido horário. Isso comprova novamente a observação anterior sobre a figura 3.9 que mostra alta velocidade no centro do perfil cisalhante. Outra característica da figura 3.10 é que as assimetrias observadas estão dividindo a geometria anular e resultam dos termos de curvatura das coordenadas cilíndricas axissimétricas.

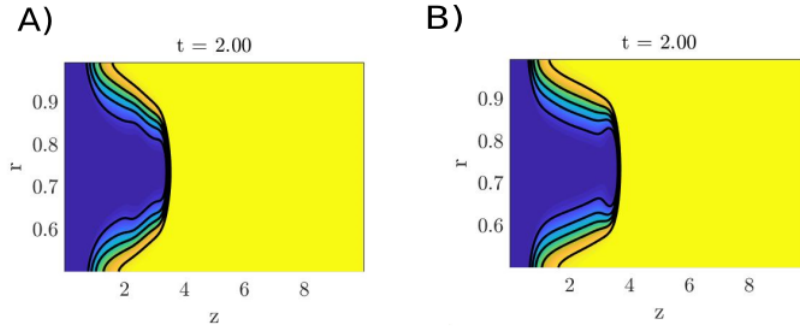


Figura 3.11: Comparação das interfaces dos campos de concentração entre A) $Re = 1000$ e B) $Re = 100$.

Continuando as análises dos parâmetros físicos, iremos analisar agora como o número de Péclet influencia o comportamento do fluido que está sendo trabalhado. O primeiro gráfico gerado tem o mesmo objetivo da figura 3.6, queremos verificar como ao longo da direção axial o perfil do fluido se modifica conforme aumentamos o número de Péclet.

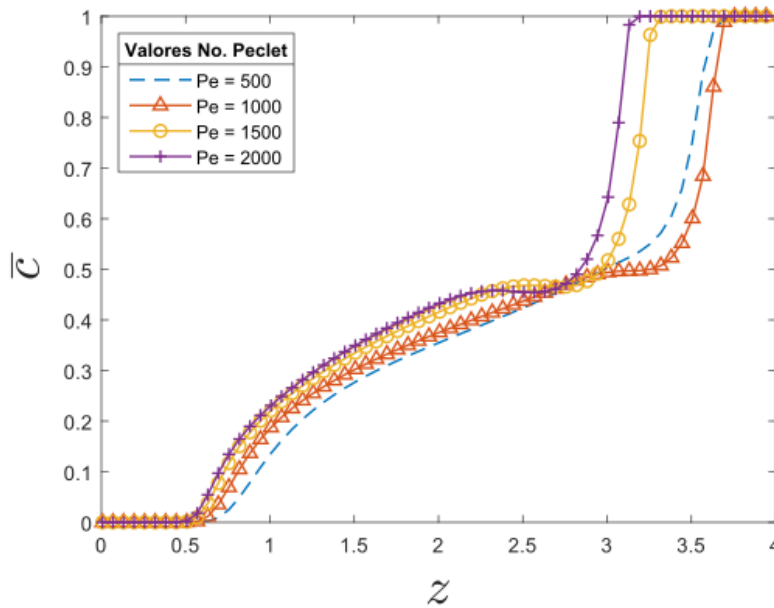


Figura 3.12: Análise da concentração média ao longo da direção axial, para diferentes números de Péclet.

Uma análise interessante da figura 3.12 é que o comportamento do fluido se mantém bem parecido na faixa de $c = 0$ até 0.5, após essa faixa temos uma separação dos comportamentos bem nítidas. Nos números de Péclet igual a 2000 e 1500, percebemos que a concentração atingi o valor de 1 de forma

antecipada, entre $z = 2.5$ e 3.3 . Enquanto nos números de Péclet menores, $Pe = 500$ e 1000 , a concentração atinge o valor de 1 entre $z = 3.5$ e 4 . Isso significa que altos Números de Pe reduzem o comprimento da mistura.

Interessante relembrar que quanto maior o número de Péclet, menor é a taxa de difusão do fluido, gerando interfaces mais finas com contornos mais próximos.

No caso do número de Péclet, é importante analisarmos quais características encontramos nas interfaces do fluido variando diferentes valores do campo de concentração. Iremos continuar trabalhando com os valores de Péclet mencionado anteriormente ($Pe = 500, 1000$ e 2000).

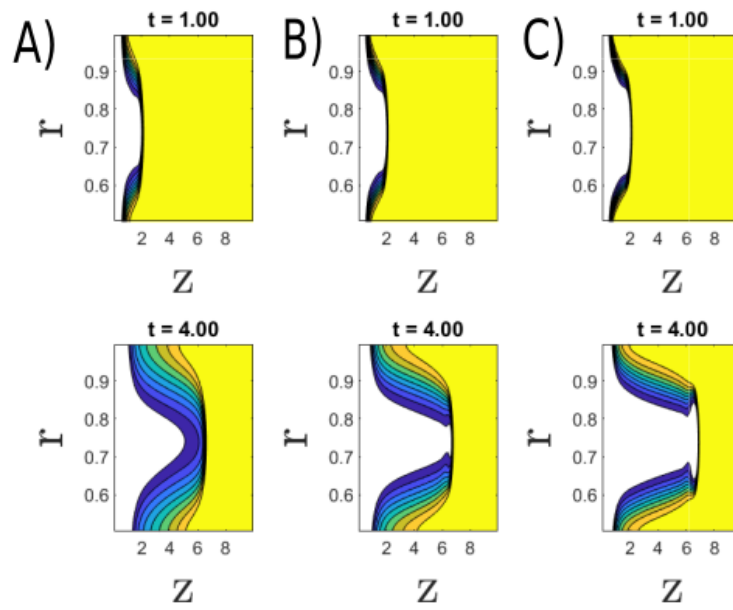


Figura 3.13: Análise dos contornos com valores do campo de concentração $c = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$, em $t = 1$ e 4 (A) $Pe = 500$ (B) $Pe = 1000$ (C) $Pe = 2000$

É interessante notar a diferença de perfil encontrada na figura 3.13. Percebemos que em tempos menores, $t = 1$, temos os contornos mais agrupados, diferentemente do que ocorre em $t = 4$ em que temos os contornos menos agrupados e com maior volume. Uma das hipóteses é que esse movimento ocorre possivelmente pois temos uma maior taxa de difusão em números menores de Péclet.

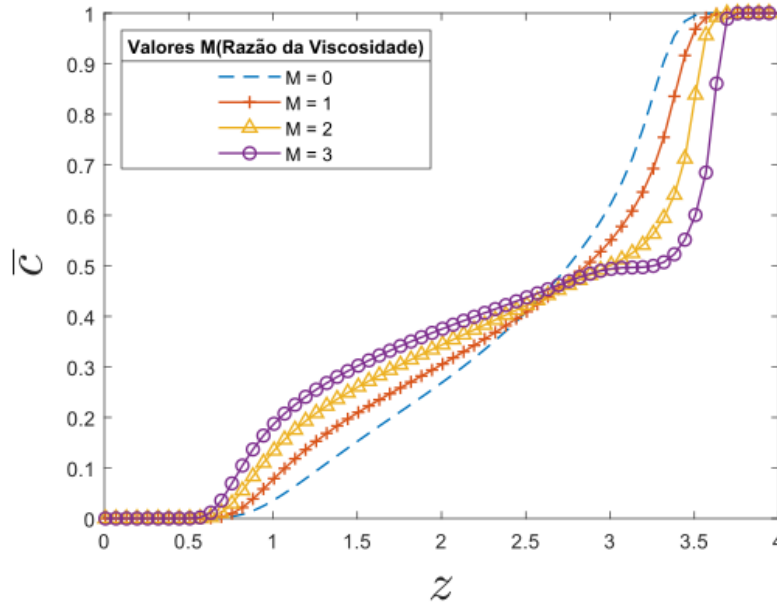


Figura 3.14: Comparação da concentração média para diferentes Valores de M (M igual o log da razão entre μ_2 e μ_1)

A fim de complementar a figura 3.14, iremos fixar o valor da $c = 0,5$ e analisar o comportamento dos fluidos para essas diferentes razões de viscosidade.

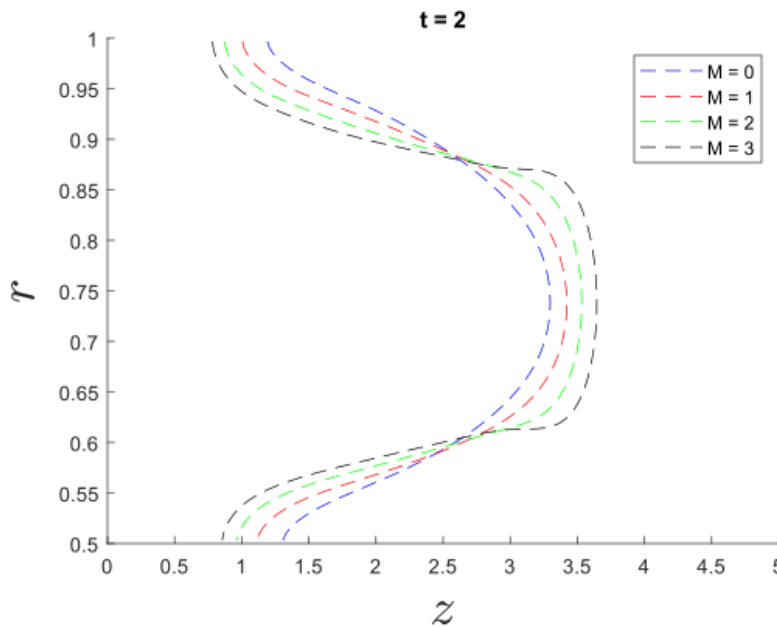


Figura 3.15: Comparação entre as razões de viscosidade do comportamento dos fluidos com a concentração fixada em 0,5.

A figura 3.15 ilustra melhor o comprimento maior da mistura conforme

a razão de viscosidade vai aumentando. Além de possuímos um gráfico mais parabólico em valores menores de M .

Fixando o valor de $Pe = 1000$, e variando o valor de M de 0 até 3, como podemos perceber uma condição de estabilidade em $M = 0$, apresentando o menor comprimento de mistura entre os fluidos. $M = 0$, que corresponde o momento em que μ_1 e μ_2 são iguais.

O fato de enxergarmos uma variação significativa do comportamento da interface para diferentes valores dos parâmetros de controle nesse sistema axissimétrico, nos sugere que é importante realizar uma investigação do sistema em 3D. É apenas nessa investigação 3D que iremos verificar a instabilidade do problema físico envolvido, pois leva em consideração variações azimutais.

A ideia principal de variar o valor de F_z é verificar como a densidade e os efeitos gravitacionais interferem no perfil de deslocamento do fluido. Importante ressaltar que até então as simulações foram feitas considerando fluidos de mesma densidade. Após uma análise inicial, definimos os valores dessa força variando entre uma janela de -1000 até 1000, conforme imagem a seguir:

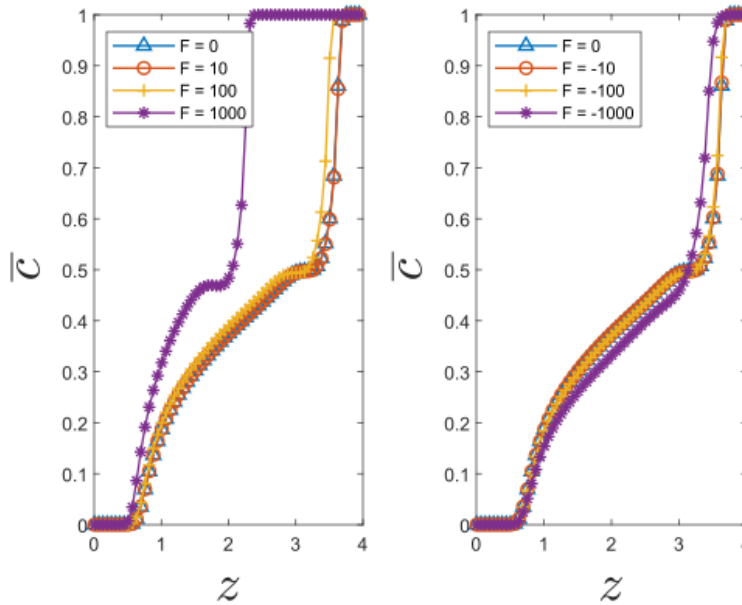


Figura 3.16: Comparação da densidade na direção axial

É conhecido que valores positivos de F correspondem a injeção de um fluido mais denso num deslocamento vertical ascendente. Na figura 3.16 vale destacar como a $F_z = 1000$ destoa bem dos resultados encontrados com as outras curvas axiais, apresentando um comprimento de mistura menor. Isso tendo como referência $F_z = 0$, momento em que estamos considerando um problema

em que ambos os fluidos têm a mesma densidade e os efeitos gravitacionais são desprezados, percebe-se que os outros valores não se diferenciam muito, não alterando o perfil do escoamento, sendo o valor de $F_z = 1000$ o único que foge do padrão. Um caso interessante que ocorre na figura 3.16 é $F = -1000$ estar atingindo a $c = 1$ anteriormente do que os outros valores negativos de F . Isso não era esperado pois o fluido em $F = -1000$ é menos denso, seria esperado que o empuxo acelerasse a interface, alcançando $c = 1$ mais rapidamente. Uma análise que seria interessante aprofundar para compreender o motivo desse comportamento não esperado.

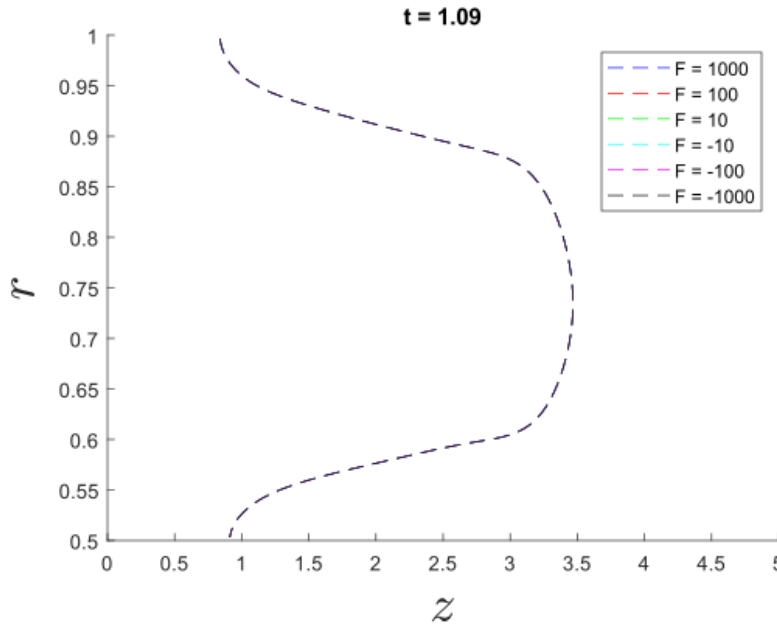


Figura 3.17: Contorno $c = 0.5$ do campo de concentração para diferentes valores de F e $t = 1.09$

Na figura 3.17, realizamos as comparações do contorno $c = 0.5$ do campo de concentração para diferentes valores de F em $t = 1.09$, pois foi o momento que a simulação de $F = 1000$ parou. Não se sabe o real motivo para essa paralisação. Interessante notar que apesar de na figura 3.16 $F = 1000$ ter um comprimento de mistura menor, na figura 3.17 percebemos que independente do valor de F , o contorno $c = 0.5$ tem o mesmo contorno em $t = 1.09$. Por termos como característica a condição de axissimetria, apenas podemos investigar deslocamentos verticais. Com isso, em nosso código a variável F_y será sempre igual a zero.

A última investigação dos parâmetros passa por compreender como a abertura anular afeta o perfil do deslocamento, essa análise será realizada alterando os valores do Raio interno, R_{int} .

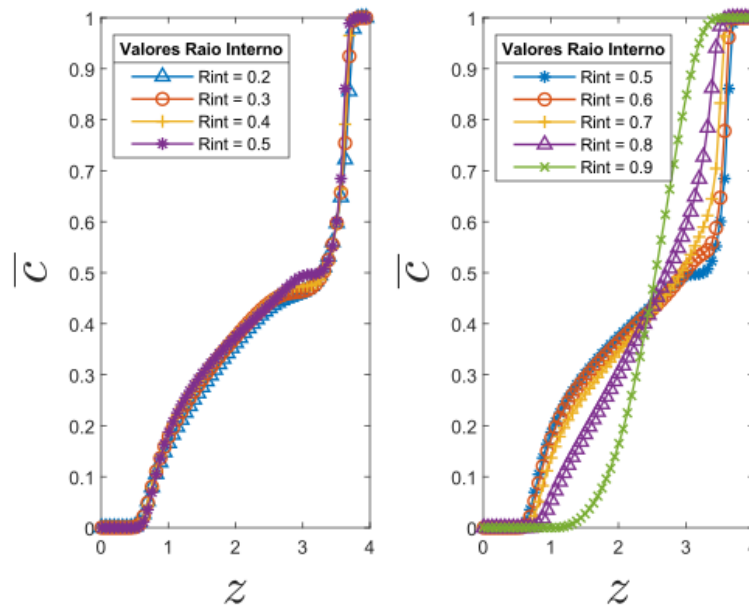


Figura 3.18: Análise da concentração ao longo do eixo axial, variando a abertura anular

Em um primeiro momento, a figura 3.18 já demonstra que quanto mais próximo a abertura anular está da condição de placas paralelas, $R_{int} = 1$, percebe-se um perfil variando bastante. Essa percepção é fácil identificar olhando as condições de $R_{int} = 0,9$ e $0,8$, com o comprimento de mistura menor. Com essa primeira análise, se viu interessante verificar como está o perfil do deslocamento nessas condições.

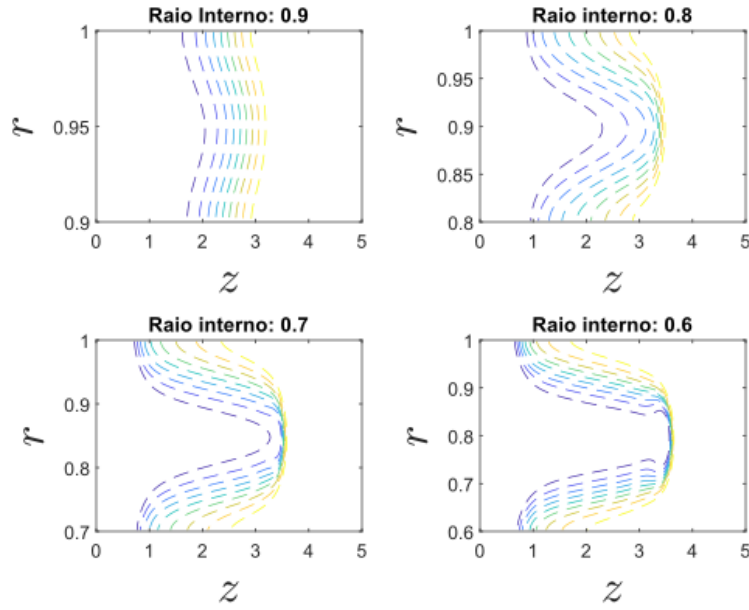


Figura 3.19: Análise do contorno do campo de concentração dos valores de $c = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ e 0.9 em $t = 2$, de acordo com a variação do Raio interno

Como na figura 3.18, percebemos que os valores sofrem menor alteração com o raio interno acima de 0,5, a figura 3.19 mostra bem isso. Focamos em analisar o contorno do campo de concentração de $c = 0.1$ até $c = 0.9$ dessa parcela. Percebe-se contornos bem diferentes entre si, isso provavelmente se dá porque quanto mais próximo do valor de $R_i = 1$, mais próximo o anular está de estar completamente fechado.

4

Conclusão

O estudo teve como foco demonstrar a influência de diversos fatores no comportamento dos fluidos em espaços anulares. Fez parte das nossas simulações analisar as interfaces dos fluidos, as densidades, taxas de injeções e geometria do local onde ocorre o deslocamento.

Num primeiro momento, se fez importante compreender o perfil de deslocamento do fluido de trabalho. Essa primeira análise foi importante para compreender toda a parte geométrica e física do projeto. Passando por formalizar as equações de Navier Stokes em coordenadas cilíndricas, no nosso caso em componentes radial e axial.

As análises sobre o passo de tempo (d_t) e os pontos por unidade de comprimento ao longo da direção radial (N_y), nos mostraram que essas duas variáveis com erro controlado nos permite ter uma maior gama de possibilidades ao analisar os parâmetros físicos.

Os gráficos obtidos nos deram uma tendência de que números de Reynolds altos, fornecem comportamentos diferentes. As comparações nos mostraram uma interface diferente principalmente nos valores de $r = 0.6$ e 0.9 . Percebemos que existe uma aceleração do campo da velocidade dentro da interface em que foi trabalhada, sendo uma alta velocidade no centro do perfil cisalhante.

Sobre o número de Peclet percebe-se que altos números tem relação direta com a redução do comprimento da mistura. Foi verificado também que em tempos menores, os contornos do campo concentração ficam mais agrupados, enquanto em tempos maiores, verificamos os contornos menos agrupados e com maior volume.

Na análise sobre a razão de viscosidade verificamos que quanto menor este parâmetro, menor é o comprimento da mistura. O que chamou atenção na análise de F_z é que quando igual a -1000 , não foi encontrado o comportamento esperado de atingir o valor de $c = 1$ anteriormente do que os outros valores negativos. Com isso, seria interessante aprofundar em uma próxima análise os motivos para isso.

Importante ressaltar que o objetivo da tese foi concluído, visto que conseguiu-se gerar uma quantidade significativa de resultados, dando uma boa compreensão das dificuldades enfrentadas nesse tipo de estudo e toda a dificuldade relacionada ao processo de cimentação de poços de petróleo, envolvendo várias condições, hipóteses, situações e simulações. É interessante prosseguir com esse estudo, possivelmente numa Pós-Graduação, buscando

uma compreensão mais ampla de todos os possíveis parâmetros que influenciam o comportamento do fluido, além de desenvolver os algoritmos envolvidos na análise.

Referências Bibliográficas

- [1] SCHLUMBERGER. Well cementing fundamentals. Well Cementing Fundamentals. <http://www.slb.com/>, 2022. Acesso em: Agosto de 2022.
- [2] ULISSES TARGINO BEZERRA. Compósitos portland-biopolímero para cimentação de poços de petróleo. Master's thesis, 2006.
- [3] A. ERATI; A. ROUSTAEI; I.A. FRIGAARD. Strategies for mud-removal from washouts during cementing of vertical surface casing. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 195:107454, 2020.
- [4] M. ZARE; A. ROUSTAEI; I.A. FRIGAARD. Buoyancy effects on microannulus formation: Density stable displacement of Newtonian-Bingham fluids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 247:22–40, 2017.
- [5] S. AKBARI; S.M. TAGHAVI. Fluid experiments on the dump bailing method in the plug and abandonment of oil and gas wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 108920:205, 2021.
- [6] R. ZHANG; I.A. FRIGAARD. Primary cementing of vertical wells: displacement and dispersion effects in narrow eccentric annuli. *Journal of Fluid Mechanics*, 947:A32, 2022.
- [7] E. TRUDEL; M. BIZHANI; M. ZARE; I.A. FRIGAARD. Plug and abandonment practices and trends: A british columbia perspective. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 183:106417, 2019.
- [8] S RIBEIRO; MF NACCACHE. Finite element model of oil well cement curing process in the presence of fluid loss zone. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44:1–15, 2022.
- [9] J. KIM; P. MOIN. Application of a fractional-step method to incompressible navier-stokes equations. *Journal of Computational Physics*, 59:308–323, 1985.
- [10] MAN MOHAN RAI; PARVIZ MOIN. Direct simulations of turbulent flow using finite-difference schemes. *Journal of Computational Physics*, 96:15–5113, 1991.