



Frederico Resende de Carvalho

**Deslocamento Axissimétrico de Fluidos
Miscíveis em Anulares com Expansão Abrupta**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Rafael Menezes de Oliveira

Rio de Janeiro
Abril de 2023



Frederico Resende de Carvalho

**Deslocamento Axissimétrico de Fluidos
Miscíveis em Anulares com Expansão Abrupta**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo:

Prof. Rafael Menezes de Oliveira

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

DSc. André Leibshon Martins

Petróleo Brasileiro - Rio de Janeiro - Matriz

Profa. Mônica Feijó Naccache

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 28 de Abril de 2023

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial do trabalho, é proibida sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

Frederico Resende de Carvalho

Graduou-se em Engenharia Mecânica pela UFSC : Universidade Federal de Santa Catarina. Desenvolveu diversos projetos de complementação de poços em diversas empresas prestadoras de serviços no Brasil.

Ficha Catalográfica

Resende de Carvalho, Frederico

Deslocamento Axissimétrico de Fluidos Miscíveis em Anulares com Expansão Abrupta / Frederico Resende de Carvalho; orientador: Rafael Menezes de Oliveira . – 2023.

115 f: il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2023.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Engenharia Mecânica – Teses. 3. Cimentação Primária. 4. Deslocamento. 5. Poço. 6. Fluidos Newtonianos. 7. Miscíveis. 8. Axissimétrico. 9. Viscosidade. 10. Navier-Stokes. 11. Expansão abrupta. 12. Direct Numerical Simulation. 13. Escoamento bifásico. 14. Advecção. 15. Difusividade. 16. Densidade. I. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. II. Título.

CDD: 620.11

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer especialmente ao meu orientador Prof. Rafael Menezes de Oliveira. Em particular, quero manifestar o meu apreço ao professor que, além de orientador, tem sido um motivador. Eu não tenho palavras para expressar minha sincera gratidão a ele, pela sua paciência, didática e disponibilidade. Realmente me considero afortunado por ter tido a oportunidade em trabalhar com um profissional com o conhecimento e a didática, do professor Rafael, nestes últimos anos durante o meu mestrado.

Agradeço ao DEM pela parceria e pelo apoio de todos membros do departamento, em especial ao coordenador Prof. Florian Pradelle e ao Prof. Igor B. de Paula.

Também sou grato aos membros da minha banca examinadora, Prof. Mônica F. Naccache e Dr. André Leibsohn Martins, que se comprometeram muito generosamente seu tempo e conhecimento para avaliar a minha dissertação. Sou grato também à minha família por cada minuto de amor, estímulo, paciência, encorajamento e força. A minha mãe pela admiração e apoio, mesmo a muitos quilômetros de distância, que tem sido essenciais para encontrar forças e continuar lutando pelos meus objetivos.

Meus agradecimentos também a meus colegas de trabalho. Palavras não podem expressar a imensidão da gratidão que tenho por eles.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Resende de Carvalho, Frederico; . **Deslocamento Axissimétrico de Fluidos Miscíveis em Anulares com Expansão Abrupta.** Rio de Janeiro, 2023. 115p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Um das etapas mais complexas e críticas durante a construção de poços de petróleo é o processo de cimentação primária, definido como: "O processo de instalação de cimento no anular entre o revestimento e a formação exposta ao poço" [1]. Ela fornece isolamento zonal permanente para evitar contaminação ou migração de fluidos indesejáveis no anular, protege o revestimento da ocorrência de corrosão e fornece estabilidade hidráulica e mecânica para o revestimento ao longo da vida produtiva do poço de petróleo. Neste processo, ainda na etapa de perfuração, irregularidades na seção transversal (*washouts*) podem ser geradas como resultado de diversos colapsos parciais da seção do poço aberto em decorrência da presença de rochas pouco consolidadas da formação. Uma operação de cimentação primária bem sucedida dependerá se o sistema de fluidos espaçadores e a pasta de cimento deslocam de forma adequada e completa o fluido de perfuração do anular e *washouts*.

Motivados por esse problema industrial, a presente dissertação usa um simulador numérico DNS (*Direct Numerical Simulation*) com o objetivo de analisar sistematicamente o comportamento hidrodinâmico e calcular a eficiência do deslocamento entre dois fluidos newtonianos miscíveis através de um anular contendo uma expansão seguida de uma contração abrupta. Investigamos como diferentes viscosidades e densidades dos fluidos, um injetado e outro deslocado, a miscibilidade entre eles, a taxa de injeção e a dimensão do *washout* retangular afetam o escoamento bifásico. Consideramos uma geometria axissimétrica durante processos de deslocamentos verticais, e as equações governantes são resolvidas em coordenadas cilíndricas, permitindo investigar diferentes aberturas anulares. Devido à miscibilidade entre os fluidos, nossos resultados preveem eficiências de deslocamento altíssimas, próximas a 100

Fluidos não-newtonianos são usualmente utilizados durante o processo industrial de cimentação primária de poços de petróleo. Contudo, as altas eficiências de deslocamentos encontradas em nossos resultados motivam estudos futuros sobre a influência da miscibilidade em deslocamentos de fluidos complexos. Estes resultados também motivam o uso de fluidos espaçadores para tentar controlar as propriedades de interface. Desta forma, é possível que a utilização de sistemas que se aproximem das condições reológicas e hidrodinâmicas de deslocamento entre fluidos newtonianos miscíveis poderá contribuir para

um aumento da eficiência de deslocamento e, conseqüentemente, otimizar o processo de deslocamento de sistemas de fluidos, tendo em vista melhorias na integridade da cimentação de poços de petróleo.

Palavras-chave

Cimentação Primária; Deslocamento; Poço; Fluidos Newtonianos; Miscíveis; Axissimétrico; Viscosidade; Navier-Stokes; Expansão abrupta; Direct Numerical Simulation; Escoamento bifásico; Advecção; Difusividade; Densidade.

Abstract

Resende de Carvalho, Frederico; (Advisor). **Axisymmetric Displacement of Miscible Fluids in Annulars with Abrupt Expansion**. Rio de Janeiro, 2023. 115p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

One of the most complex and critical stages during the construction of oil wells is the primary cementing process, defined as "the process of installing cement in the annulus between the casing and the exposed formation to the well" [1]. Primary cementing provides permanent zonal isolation to prevent contamination or migration of unwanted fluids in the annulus, protects the casing from corrosion, and provides hydraulic and mechanical stability for the casing throughout the productive life of the oil well. In this process, during the drilling stage, irregularities in the cross-section (washouts) can be generated because of various partial collapses of the open wellbore section due to the presence of poorly consolidated rocks in the formation. A successful primary cementing operation will depend on whether the spacer fluid system and cement slurry adequately and completely displace the drilling fluid from the annulus and washouts.

Motivated by this industrial problem, the present dissertation uses a Direct Numerical Simulation (DNS) numerical simulator to systematically analyze the hydrodynamic behavior and calculate the displacement efficiency between two miscible newtonian fluids through an annulus containing an expansion followed by an abrupt contraction. We investigate how different viscosities and densities of the injected and displaced fluids, their miscibility, injection rate, and the dimension of the rectangular washout affect the two-phase flow. We consider an axisymmetric geometry during vertical displacement processes, and the governing equations are solved in cylindrical coordinates, allowing the investigation of different annular clearances. Due to the miscibility between the fluids, our results predict very high displacement efficiencies, close to 100

Non-newtonian fluids are commonly used during the industrial process of primary cementing of oil wells. However, the high displacement efficiencies found in our results motivate further studies on the influence of miscibility in displacements of complex fluids. These results also encourage the use of spacer fluids attempting to control the interfacial properties. Therefore, the use of systems that approximate the rheological and hydrodynamic conditions of displacement between miscible newtonian fluids may contribute to an increase

in displacement efficiency and, consequently, optimize the displacement process of fluid systems, aiming at improvements in the integrity of well cementing.

Keywords

Primary Cementing; Displacement Flow; Newtonian Fluids; Miscible Fluids; Abrupt Expansion; Axisymmetric Flow; Viscosity; Navier-Stokes; Washout; Direct Numerical Simulation; Advection; Difusivity; Density;.

Sumário

1	Introdução	18
1.1	Motivação e Relevância do Tema	18
1.2	Objetivos da Pesquisa	23
1.3	Delimitação do Estudo	23
1.4	Técnicas Empregadas	27
1.5	Referências Bibliográficas	29
1.6	Estrutura da Dissertação	34
2	Modelagem Matemática	35
2.1	Abordagem Geométrica e Condições Iniciais e de Contorno do Problema	36
2.1.1	Resumo das Condições Iniciais e de Contorno	39
2.1.2	Equações Governamentais	40
2.2	Análise do Espectro dos Parâmetros Adimensionais Utilizados na Pesquisa em Relação à Aplicação Industrial	45
2.3	Estudo de Malha	48
3	Resultados, Análises e Discussões	57
3.1	Metodologia para o Cálculo da Eficiência de Deslocamento	58
3.2	Comportamento Hidrodinâmico Segundo Diferentes Configurações Geométricas	59
3.2.1	A Influência do Espaço Anular entre Revestimento e Poço Aberto no Comportamento Hidrodinâmico do Deslocamento	62
3.2.2	Influência das Dimensões da Expansão Abrupta - Aumento do Comprimento Axial L do <i>Washout</i>	66
3.2.3	Influência das Dimensões da Expansão Abrupta - Profundidade Radial H do <i>Washout</i>	69
3.3	Análise do Comportamento Hidrodinâmico Segundo Parâmetros Hidrodinâmicos e Viscosidades	73
3.3.1	Regime de Fluxo do Deslocamento - Influência do Número de <i>Reynolds</i>	73
3.3.2	Efeitos Advectivos e Difusivos - Influência do Número de Péclet	84
3.3.3	Efeitos Gravitacionais - Influência do Fator Gravitacional (Número de <i>Galilei</i>)	95
3.3.4	Efeitos da Viscosidade - Razão entre Viscosidades	102
4	Conclusão e Trabalhos Futuros	108
5	Reconhecimentos	111
	Referências bibliográficas	112

Lista de figuras

Figura 1.1 Sequência operacional básica de cimentação primária de um poço de petróleo. BITTLESTON et al. (2001) [2].	19
Figura 1.2 [5] Quatro diferentes categorias de geometrias simétricas de washouts: (a) expansão-contração abrupta <i>square wave</i> ; (b) <i>triangular wave</i> ; (c) <i>sinusoidal wave</i> ; (d) <i>semi-fractal or koch snow flake</i> . ROUSTAEI & FRIGAARD (2015) [5].	22
Figura 1.3 Diversas combinações entre poço aberto e tamanho de revestimento de produção utilizadas na cimentação de poços de petróleo, cf. WAN (2011) [15]	25
Figura 1.4 [3] Discretização do anular em fatias ao longo do poço para modelagem de escoamento anular através de um modelo cinemático simples.	28
Figura 2.1 Figura ilustrando as condições iniciais das simulações do modelo 2-D abordadas.	37
Figura 2.2 Ilustração de um <i>washout</i> localizado no anular de um poço vertical cimentado : a) Esquema de um poço vertical. b) Imagem ampliada ilustrando a irregularidade. c) Seção longitudinal axissimétrica 2-D simplificada. d) Modelo geométrico axissimétrico 2-D simplificado do tipo <i>square wave</i> .	38
Figura 2.3 Figura representando o perfil desenvolvido da velocidade $v_z(r)$ em um anular concêntrico	39
Figura 2.4 Simulação dos perfis da concentração entre dois fluidos newtonianos miscíveis para diferentes intervalos de tempo adimensional, através de um anular estreito, com os parâmetros adimensionais: $Re = 1$, $Pe = 1000$, $F = 0$ e $\eta = 2$: (a) $t = 0$; (b) $t = 25$; (c) $t = 50$;	49
Figura 2.5 Simulação demonstrando: a) velocidade correspondente à $v_{z(tip)}$, que representa a velocidade axial do ponto localizado mais ao extremo da isolinha de concentração adimensional associada a $c = 0.5$ e b) perfil de concentração correspondente. $Re = 1$, $Pe = 1000$, $F = 0$ e $\eta = 2$.	50
Figura 2.6 Curvas da velocidade axial de propagação para concentração $c = 0.5$ em função do tempo $0 < t < 1.9$, para diversos intervalos de passo de tempo Δt , arbitrariamente selecionados.	51
Figura 2.7 Determinação das curvas de erro percentual do passo de tempo numérico, tendo como referência a velocidade axial da propagação da isolinha de concentração em $c = 0.5$ em função do tempo.	52
Figura 2.8 Perfis simulados da frente de concentração para diferentes densidades de malha numérica em $t = 3.6$ a) <i>Mesh</i> 100x10, b) <i>Mesh</i> 400x40, c) <i>Mesh</i> 800x80 e d) <i>Mesh</i> 1500x150. Os parâmetros adimensionais utilizados foram: $Re = 1$, $Pe = 1000$, $\eta = 2$ e $F = 0$.	54

Figura 2.9	Perfis da velocidade axial v_z para as diversas resoluções de malha 100×10 , 400×40 , 800×80 e 1500×150 . Os parâmetros adimensionais utilizados foram: $Re = 1$, $Pe = 1000$, $\eta = 2$ e $F = 0$.	55
Figura 2.10	Figura ilustrando a malha original selecionada nas simulações e análises.	56
Figura 2.11	Curvas de erros percentuais na região expandida para $3.5 \leq z \leq 6.5$ em função da densidade de malha. a) Erro percentual das curvas de velocidade axial e b) Erro percentual dos perfis de concentração.	56
Figura 3.1	Modelo geométrico simplificado do poço em referência à tabela 3.2	61
Figura 3.2	Configurações geométricas do poço de petróleo em referência às dimensões da Tabela 3.3	62
Figura 3.3	Simulações demonstrando as frentes de propagação do escoamento entre dois fluidos isodensos para diferentes diâmetros de revestimento, de cima para baixo: $R_{int} = 0.5$, $R_{int} = 0.6$, $R_{int} = 0.7$ e $R_{int} = 0.8$. E da esquerda para direita, nos instantes: $t = 15$, $t = 45$ e $t = 75$, com parâmetros hidrodinâmicos: $Re = 1$, $Pe = 1000$, $F = 0$ e razão entre viscosidades $\eta = 2$.	63
Figura 3.4	Gráficos da concentração média \bar{c} ao longo do raio em função de z para os instantes de tempo $t = 15$, $t = 45$ e $t = 75$, da esquerda para direita, considerando os diferentes diâmetros de revestimento R_{int} .	64
Figura 3.5	Gráficos simulando a velocidade v_z em função do eixo das ordenadas r para os instantes de tempo $t = 15$, $t = 45$ e $t = 75$, da esquerda para direita, considerando os diferentes diâmetros de revestimento R_{int} , localizados em $z = 12,5$ e $z = 25$ respectivamente.	65
Figura 3.6	Eficiência do deslocamento ϵ , calculada a partir da média da concentração em relação aos eixos radial e axial (r e z respectivamente), para um intervalo de tempo adimensional $0 < t < 90$, para diferentes raios internos R_{int} .	66
Figura 3.7	Representações gráficas das simulações dos perfis de concentração para os instantes, da esquerda para direita, $t = 15$, $t = 45$ e $t = 75$, para comprimentos de <i>washouts</i> , de cima para baixo, de $L = 3$, $L = 23$ e $L = 43$, respectivamente. A linha à esquerda de cada gráfico representa a isolinha de concentração $c \approx 0$, correspondente ao fluido deslocador (<i>Fluido 1</i>) e a isolinha da direita correspondendo ao fluido deslocado com concentração $c \approx 1$.	68
Figura 3.8	Eficiência do deslocamento ϵ , calculada a partir da média da concentração em relação aos eixos radial e axial (r e z respectivamente), para um intervalo de tempo adimensional $0 < t < 90$, para diferentes comprimentos de <i>washout</i> .	69

- Figura 3.9 RENTERIA et al. (2018) [30] : Deslocamento através de tubos concêntricos com diferentes profundidades de *washouts*. Na esquerda, simulações em diversos instantes de tempo e na direita a eficiência volumétrica ao longo do tempo para diversas profundidades de *washouts*. 70
- Figura 3.10 Representação gráfica das simulações das frentes de propagação da concentração para comprimentos radiais adimensionais de *washouts*, de cima para baixo: $H = 0.2$, $H = 0.4$ e $H = 0.6$. Nos instantes de tempos adimensionais, da esquerda para direita de: $t = 30$, $t = 60$ e $t = 90$. Demonstrando as isolinhas de propagação da concentração para o *Fluido 1*, $c \approx 0$ e *Fluido 2*, $c \approx 1$. 71
- Figura 3.11 Eficiência do deslocamento ϵ , calculada a partir da média da concentração em relação aos eixos radial e axial (r e z respectivamente), para um intervalo de tempo $0 < t < 90$ para diâmetros externos de *washout* de $H = 0.2$, $H = 0.4$ e $H = 0.6$. 72
- Figura 3.12 Gráfico que ilustra a geometria, domínios e condições de contorno utilizadas durante o estudo dos parâmetros hidrodinâmicos e reológicos. 74
- Figura 3.13 Simulações da propagação das frentes de concentração para os instantes de tempo : 15, 30 e 45; da esquerda para direita; para números de *Reynolds*: 1, 250, 1250 e 2000; de cima para baixo. 76
- Figura 3.14 Simulações das curvas de concentração média, ao longo do eixo radial r no intervalo de tempo de escoamento $0 \leq t \leq 90$, para números de *Reynolds* 1, 250, 1250 e 2000, respectivamente a), b), c) e d), a influência de Re na média \bar{c} é observada para tempos curtos, próximo à expansão. 78
- Figura 3.15 Vista ampliada da frente de propagação de concentração, gráficos à esquerda, onde $0 \leq z \leq 20$ para o instante adimensional $t = 15$, com números de *Reynolds* (1, 250, 1250 e 2000, de cima para baixo) e seus respectivos campos de velocidade v_z , gráficos à direita. 79
- Figura 3.16 Vista ampliada da frente de propagação de concentração, onde $0 \leq z \leq 20$ para o instante adimensional $t = 15$, com números de *Reynolds* (1, 250, 1250 e 2000, de cima para baixo) e seus respectivos campos de velocidade axial v_z , figuras à direita. As curvas tracejadas mostram linhas de corrente e destacam regiões com recirculações. 81
- Figura 3.17 Decomposição do campo de velocidades em velocidades axiais v_z : a), c), e) e g) e velocidades radiais v_r : b), d), f) e h) para os números de *Reynolds* : 1, 250, 1250 e 2000, de cima para baixo, em pontos da coordenada z (2, 5, 25, 30 e 40). 82

- Figura 3.18 Eficiência do deslocamento ϵ , calculada a partir da média da concentração em relação aos eixos radial e axial (r e z respectivamente), no intervalo de tempo $0 \leq t \leq 90$, para diversos número de *Reynolds* : 1, 250, 1250 e 2000. Observamos que para $Pe = 1000$ e para a faixa de Re investigada, a eficiência de deslocamento não sofre alterações significativas. 84
- Figura 3.19 Simulações de diferentes perfis de propagação da concentração com diferentes números de Pe (de cima para baixo : 1000, 6000, 10000 e 50000), nos instantes de tempo adimensional (Da direita para esquerda : $t=15$, $t=45$ e $t=75$). 87
- Figura 3.20 Ampliação dos gráficos das frentes de propagação da concentração para o instante $t=15$: $Pe = 1000$, 6000, 10000 e 50000, respectivamente a), b), c) e d). Deslocamentos com valores menores de Pe suavizam os perfis de concentração, favorecendo a obtenção de altas eficiências de deslocamento. 88
- Figura 3.21 Simulação gráfica das linhas de corrente para $Pe = 10000$ em $t = 15$. 89
- Figura 3.22 Curvas das concentrações médias do eixo radial r para diversos instantes de tempo, ao longo do eixo axial z , para números de *Péclet* (1000, 6000, 10000 e 50000, respectivamente, a), b), c) e d)). 90
- Figura 3.23 Perfis das velocidades axiais v_z , gráficos da esquerda, e velocidades radiais v_r , gráficos da direita, para diferentes números de *Péclet* (1000, 6000, 10000 e 50000, de cima para baixo), no instante $t = 45$ em diferentes posições ao longo do eixo axial z (2, 5, 25, 30 e 40). 92
- Figura 3.24 Velocidade média axial v_z no instante $t = 45$ para diversos números de *Péclet* (1000, 6000, 10000 e 50000). Uma fração menor da energia cinética adicionada ao sistema no processo de injeção é dissipada em processos difusivos à medida que aumentamos o número de *Péclet*. Isso justifica o fato de maiores velocidades serem observadas para maiores valores desse parâmetro. 93
- Figura 3.25 Eficiência do deslocamento ϵ , calculado a partir da média da concentração em relação aos eixos radial e axial (r e z respectivamente) para diversos números de *Péclet* (1000, 6000, 10000 e 50000) no intervalo de tempo $0 \leq t \leq 90$. Conforme evidenciada pelas figuras 3.20 e 3.22, a presença de alta difusão na interface entre os fluidos favorece a obtenção de altas eficiências de deslocamento. 94
- Figura 3.26 Simulação de perfis de propagação da concentração utilizando-se diversos parâmetros gravitacionais (De cima para baixo : -3000, 0 e 3000) para os instantes de tempo $t = 15$, 30, 45 e 65. Da esquerda para direita. A injeção de um fluido mais denso ($F < 0$) em deslocamentos verticais ascendentes aumenta o gradiente de concentração na interface, reduzindo a mistura entre as fases. 97

Figura 3.27 Ampliação do deslocamento, para $0 \leq z \leq 20$, da figura 3.26, no instante $t = 15$, para diversos parâmetros gravitacionais ($F = -3000, 0$ e 3000 , respectivamente a), b) e c)).	98
Figura 3.28 Concentração média \bar{c} em relação ao eixo radial r para valores de $F = -3000, 0$ e 3000 , respectivamente a), b) e c)	99
Figura 3.29 Eficiência do deslocamento ϵ , calculado a partir da média da concentração em relação aos eixos radial e axial (r e z respectivamente) para valores de $F = -3000, 0$ e 3000 em função do tempo $0 \leq t \leq 90$.	99
Figura 3.30 Perfil da propagação das concentrações para $c=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ e 1 , para diferentes parâmetros gravitacionais de <i>Galilei</i> (De cima para baixo, $-3000, 0$ e 3000) para os instantes $t=30, 50, 61$ e 75 (Da esquerda para direita), equivalentes a cada um dos instantes evidenciados pelas linhas vermelhas pontilhadas da figura 3.29	100
Figura 3.31 Simulações utilizando um fator gravitacional de <i>Galilei</i> $F = 3000$ no instante $t = 75$. a) Perfil de concentração, b) Campo de velocidade com o desmembramento da velocidade axial v_z e c) Perfis da velocidade axial v_z para diversos pontos ao longo do eixo axial z .	102
Figura 3.32 Simulações nos instantes $t = 15, t = 45$ e $t = 60$, da esquerda para direita, da propagação da concentração para diferentes razões entre viscosidades η ($-2, 0, 2$) de cima para baixo, figuras a), b), c), d) e f), g), h) e i) respectivamente.	103
Figura 3.33 Curvas da concentração média em relação ao eixo radial r , em função do eixo axial z , no sentido do deslocamento, para diferentes instantes de tempo ($15, 45$ e 60), figuras a), b) e c), respectivamente.	106
Figura 3.34 Curvas da eficiência do deslocamento ϵ a partir da média da concentração calculada em relação aos eixos radial r e axial z em função do tempo, no intervalo $60 \leq t \leq 90$ para diversos valores de razão entre viscosidades η .	107

Lista de tabelas

Tabela 1.1	Parâmetros operacionais selecionados para utilização nas simulações.	26
Tabela 2.1	Variáveis e propriedades operacionais e de fluidos comumente utilizados na indústria. Coeficientes de difusividade de acordo com estudos de SAVERY et al (2007) [18].	47
Tabela 2.2	Faixa de parâmetros adimensionais calculados a partir da tabela 2.1. Estes intervalos representam os valores dos parâmetros adimensionais que podem aparecer em campo.	48
Tabela 3.1	Estratégia metodológica geral para determinação dos resultados e simulações numéricas.	57
Tabela 3.2	Dimensões investigadas para análise do comportamento hidrodinâmico com a variação dos parâmetros geométricos adimensionais.	60
Tabela 3.3	Dimensões geométricas correspondentes às medidas adimensionalizadas considerando um poço aberto com diâmetro externo de $8\frac{1}{2}$.	60

Lista de Símbolos e Abreviaturas

c – Concentração

\bar{c} – Concentração média em relação ao eixo radial

$\bar{\bar{c}}$ – Concentração média em relação aos eixos radial e axial

$\Delta\rho$ – Diferencial de densidade

Δt – Passo de tempo computacional

D – Coeficiente de difusividade

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

DNS – *Direct Numerical Simulation*

ϵ – Eficiência do deslocamento

η – Razão entre viscosidades

F – Fator gravitacional de *Galilei*

g – Aceleração da gravidade

H – Profundidade do *washout*

L – Comprimento do *washout*

μ – Viscosidade dinâmica

$\mu(c)$ – Correlação entre viscosidade e concentração

∇ – Operador nabla

OBDF – *Oil Base Drilling Fluid*

p – Pressão

Pe – Número de Péclet

Q – Vazão de bombeio

ρ – Densidade

r – Coordenada radial

Re – Número de Reynolds

R_{ext} – Raio externo (Poço aberto)

R_{int} – Raio interno (Revestimento)

t – Tempo de deslocamento

U – Velocidade média

v – Velocidade de injeção

\mathbf{v} – Velocidade vetorial

WBDF – *Water Base Drilling Fluid*

z – Coordenada axial

1

Introdução

Na indústria de óleo e gás, uma operação de cimentação primária foi definida por NELSON (1990) [1] como: *"The process of placing cement in the annulus between the casing and the formation exposed to the wellbore"*. Sua importância está intrinsecamente associada à imensa complexidade dos fenômenos físicos e químicos ocorridos durante todas as etapas, sendo uma das fases mais críticas durante o processo de construção de poços injetores ou produtores de petróleo.

Tal criticidade está primordialmente relacionada com questões cruciais relativas à segurança do poço e conseqüentemente à mitigação de riscos associados à exposição do meio ambiente a hidrocarbonetos e outros fluidos tóxicos. Portanto, o processo de cimentação de poços de petróleo constitui uma importante função no conjunto de sistemas de barreira de segurança, sendo um dos elementos primordiais para a integridade do poço.

1.1

Motivação e Relevância do Tema

O cuidado fundamental e objetivo básico deste tipo de processo é o isolamento hidráulico e a estabilidade mecânica permanente entre o revestimento e as paredes do poço aberto, de forma que não haja qualquer migração indesejável de fluidos em direção ao interior do espaço anular, entre o poço aberto ou zonas produtivas de interesse e o revestimento. Bem como, interromper a movimentação de fluidos do poço para a formação, evitando riscos de fratura da formação rochosa, e como consequência, proteger o revestimento contra corrosão provocada por fluidos danosos advindos da formação rochosa e provisionar, devidamente ao ambiente de poço, a estabilidade hidráulica e mecânica necessárias para a coluna de revestimento ao longo de sua vida produtiva.

A cimentação primária ocorre após a perfuração do poço produtor ou injetor. O processo se inicia com uma pré-circulação ou condicionamento do fluido de perfuração, cujo objetivo é a remoção de fragmentos de rocha do interior do poço.

Após a retirada da coluna de perfuração e subsequente circulação para sua limpeza e condicionamento, uma longa coluna de revestimento é inserida

no interior do poço aberto, ainda contendo fluido ou fluido de perfuração, na profundidade desejada. Inicia-se novamente uma circulação do fluido de perfuração (condicionamento do fluido de perfuração) para remoção de sólidos remanescentes (fragmentos, agentes de adensamento de fluido, *filter cake*, fluido de perfuração gelificado, dentre outros depósitos). Adicionalmente, o condicionamento do fluido de perfuração tem por objetivo a substituição do fluido de perfuração mais viscoso e denso, por um fluido de perfuração mais leve e menos viscoso, com a finalidade de facilitar o deslocamento do fluido de perfuração durante a cimentação.

A partir desta etapa, um sistema espaçador de fluidos e a pasta de cimento são deslocados por meio de bombeio na superfície, através do interior do revestimento, que deverá realizar o deslocamento integral do fluido de perfuração de baixo para cima (*bottom-up*), substituindo desta forma, todo o volume correspondente ao anular entre a coluna de revestimento e o poço aberto contendo a zona de interesse, por um volume equivalente de pasta de cimento. Este processo é ilustrado através da Figura 1.1:

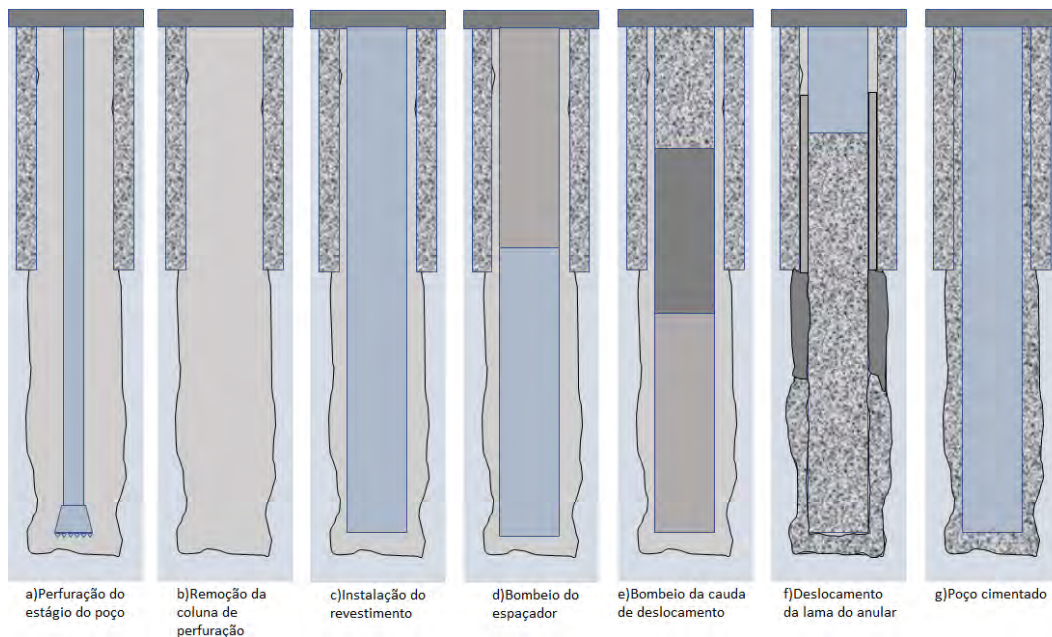


Figura 1.1: Sequência operacional básica de cimentação primária de um poço de petróleo. BITTLESTON et al. (2001) [2].

Uma sequência operacional típica de cimentação primária consiste nos seguintes passos:

- Montagem das linhas de cimentação;
- Circulação para condicionamento do poço;
- Injeção de um colchão de lavagem e/ou espaçador;

- Testes dos equipamentos e linhas de cimentação;
- Lançamento de um tampão de fundo;
- Mistura de uma pasta, geralmente mais leve, que deverá cobrir o intervalo programado;
- Mistura de uma pasta, geralmente de maior densidade e resistência à compressão, normalmente instalada próximo à sapata;
- Lançamento de um tampão de topo;
- Deslocamento com fluidos de perfuração ou solução aquosa;
- Teste de estanqueidade do revestimento;
- Descida de coluna com broca para corte das partes internas dos acessórios e limpeza do cimento residual;

No decorrer da operação de perfuração do poço, irregularidades em sua seção transversal poderão ser geradas como resultado de uma sequência de colapsos parciais da seção do poço aberto, em decorrência da presença de rochas de formação pouco consolidadas. Tais irregularidades podem potencialmente formar grandes expansões no sentido radial ao eixo do poço e são definidas como *washouts*. Estes *washouts* são geometricamente complexos e dependentes de diversas variáveis, prioritariamente sujeitos aos efeitos hidrodinâmicos do processo de perfuração, bem como ao tipo e heterogeneidade geológica das formações rochosas, tornando seu dimensionamento muitas vezes incerto, apesar da possibilidade de utilização de *calipers* especiais para seu dimensionamento.

Durante todo o processo de deslocamento da pasta de cimento através do espaço anular, uma operação de cimentação primária bem sucedida dependerá de parâmetros hidrodinâmicos e reológicos que garantam que a pasta de cimento deslocará de forma efetiva toda o fluido de perfuração para fora do anular e de qualquer irregularidade existente do poço aberto, reduzindo ao máximo, a presença de contaminantes no cimento que prejudiquem sua integridade. Portanto, a depender de fatores geológicos, parâmetros operacionais, configurações de poço e propriedades dos fluidos envolvidos, um deslocamento perfeito pode ser difícil de se obter.

Algumas dessas dificuldades estão relacionadas com bolsões de fluido de perfuração e outros resíduos, que podem se acumular nas paredes dos *washouts* gerados durante a operação de perfuração. Tais *washouts* podem conter bolsões de fluido de perfuração desidratado residual que são difíceis de serem removidas através das operações de condicionamento do fluido de perfuração. Estes acúmulos de fluido de perfuração nos *washouts* têm o potencial de contaminar o cimento durante a operação de deslocamento da pasta.

LAVROV & TORSÆTER (2016) [3] listam os principais fatores que afetam o deslocamento do fluido de perfuração durante a cimentação primária:

- (i) Perfil ou forma do poço aberto (*washouts*);
- (ii) Densidades do fluido de perfuração, pasta de cimento e demais fluidos utilizados;
- (iii) Propriedades reológicas do fluido de perfuração e pasta de cimento e outros fluidos utilizados durante as operações;
- (iv) Cronograma de injeção (taxas de bombeamento e tempo de bombeamento);
- (v) Inclinação do poço (vertical, desviado ou horizontal);
- (vi) Regimes de escoamento (laminar, turbulento ou misto);
- (vii) Perda de fluido para a formação (perda de fluido da pasta de cimento, tornando a pasta de cimento mais viscosa);
- (viii) Perdas de circulação, em que o cimento escapa para a formação por via natural ou por fraturas induzidas em cavidades na rocha;
- (ix) Posicionamento excêntrico do revestimento no poço (anular excêntrico);

Uma série de autores têm estudado de forma sistemática o comportamento hidrodinâmico de fluidos através de expansões abruptas ou irregularidades na seção transversal de um anular de dutos concêntricos. MENDES et al. (2006) [4], através de experimentos e simulações numéricas, observaram que elementos de fluidos visco-plásticos ficam retidos na região expandida por possuírem uma tensão limite de escoamento. ROUSTAEI & FRIGAARD (2015) [5] apresentaram um estudo computacional do escoamento de fluidos de *Bingham* ao longo de canais estreitos com seções irregulares para a análise do comportamento do escoamento do fluido de perfuração durante o condicionamento nas operações de cimentação primária, considerando-se diversas geometrias de *washouts* (*square wave*, *triangular wave*, *sinusoidal wave* e *kock snowflake*), figura 1.2. O estudo desconsidera os efeitos inerciais e concentra-se nos efeitos relacionados com viscosidade e a tensão limite de escoamento e mostra a tendência à ocorrência de zonas estáticas de fluidos, a depender da geometria do *washout*. O trabalho fornece uma descrição qualitativa para os resultados paramétricos dos quatro tipos de geometria, com o foco na ocorrência de zonas de fluido estacionário.

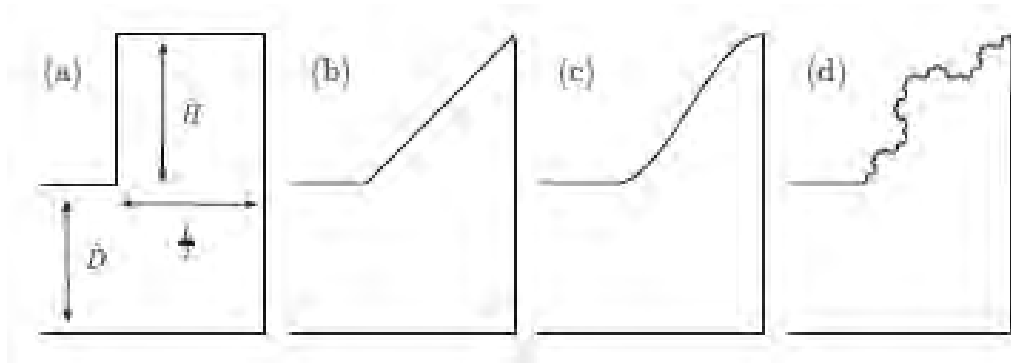


Figura 1.2: [5] Quatro diferentes categorias de geometrias simétricas de washouts: (a) expansão-contracção abrupta *square wave*; (b) *triangular wave*; (c) *sinusoidal wave*; (d) *semi-fractal or koch snow flake*.

ROUSTAEI & FRIGAARD (2015) [5].

Os autores mostram que, ao analisar uma ampla gama de diferentes geometrias de *washouts*, com diferentes formas, caracterizadas por uma altura adimensional h e comprimento L , o comportamento hidrodinâmico de cada escoamento apresenta valores similares para altos valores de h , independentemente da geometria do *washout*. Em continuidade ao trabalho [6] (2015), os autores desenvolvem o mesmo problema, porém considerando os efeitos inerciais, correlacionando-os com diferentes números de *Reynolds* e números de *Bingham*. Os autores concluem que a percepção usual da indústria de que: quanto maior a vazão de bombeio, melhor será a circulação ou condicionamento, não é sempre verdadeira. A depender dos parâmetros reológicos e densidades dos fluidos envolvidos, tal premissa pode não ser aplicável.

Para valores maiores de *Reynolds*, passando por valores mais críticos, observaram o surgimento de zonas de recirculação dentro do *washout* que podem resultar em um decréscimo da eficiência do condicionamento. Em termos gerais, a investigação mostra que, um projeto mais cuidadoso da fase de condicionamento da cimentação primária, pode ser mais proveitoso e principalmente, refuta a intuição direta da indústria de que maiores vazões resultam em operações de condicionamento mais eficientes.

Já NACCACHE et al. (2018) [7] analisaram o deslocamento de pares de fluidos imiscíveis através de um duto anular contendo uma erosão na parede do duto externo, simulando numericamente o deslocamento 2-D do fluido de perfuração durante o processo de cimentação primária, com diferentes propriedades reológicas e diferentes números de *Reynolds*. Consideraram um fluido visco-plástico deslocando um fluido newtoniano, um fluido newtoniano deslocando um fluido visco-plástico e também o deslocamento entre dois fluidos visco-plásticos. Eles observaram que a eficiência do deslocamento do fluido

é função da geometria, das razões de viscosidade e densidade, e da tensão limite de escoamento. Esse estudo corrobora a ideia de que: a eficiência do deslocamento é maior quando valores de $\frac{L}{D}$ (razão entre comprimento da expansão e diâmetro da irregularidade) são mais altos. Os autores observam também que quando os efeitos inerciais se tornam mais importantes, o fluido deslocado sofre uma advecção direta através do anular sem entrar na região erodida, diminuindo a eficiência do deslocamento.

1.2

Objetivos da Pesquisa

A presente dissertação usa um simulador numérico DNS (*Direct Numerical Simulation*), previamente desenvolvido, com o objetivo de analisar sistematicamente o comportamento do escoamento e efetuar cálculos de eficiência do deslocamento miscível de um fluido por outro com propriedades distintas.

O deslocamento é feito através de um anular estreito contendo um *washout* a jusante de um poço vertical. O trabalho visa fornecer informações e projeções quantitativas e qualitativas do comportamento hidrodinâmico de diversas geometrias e propriedades de um par de fluidos newtonianos miscíveis.

1.3

Delimitação do Estudo

Em primeiro lugar, considera-se uma geometria axissimétrica bidimensional. Desta forma, qualquer inclinação da geometria e excentricidade entre o revestimento e a seção do poço aberto são desconsideradas, limitando-se o estudo a uma determinada situação que emula o deslocamento de fluidos em poços verticais, sem a presença de escoamentos azimutais.

Durante um projeto de construção de poços existem diversas combinações possíveis que relacionam a dimensão nominal do revestimento com o tamanho do poço aberto. O diagrama da figura 1.3 é normalmente utilizado na indústria como um guia para a determinação desta relação entre essas dimensões, de forma a abranger a maioria das aplicações convencionais de construção de poços. Essa estrutura de padronização na construção de poços serve como um guia preliminar para a determinação da relação ótima entre poço aberto e o revestimento.

Primeiramente, o revestimento deve ser dimensionado de acordo com parâmetros geológicos, de completação e produção, e então é definido o tipo e tamanho de broca e consequentemente, a dimensão do poço aberto, que deve ser ligeiramente maior que os elementos do revestimento (colares e conexões) e seus acessórios como: centralizadores, raspadores, etc. Além de oferecer espaço

anular, necessário e suficiente, para um deslocamento seguro e eficiente do fluido de perfuração pelo sistema de cimentação primária e consequentemente sua instalação no poço.

Como exemplo, a partir do diagrama da figura 1.3, para um poço aberto com dimensão nominal de $12\frac{1}{4}$, utiliza-se um revestimento de $9\frac{5}{8}$ ou $9\frac{7}{8}$ (linhas sólidas) e, alternativamente, a depender de parâmetros operacionais, de produtividade e outros, o mesmo tamanho de revestimento poderia ser também utilizado em um poço aberto com dimensão nominal de $10\frac{3}{4}$ (linha pontilhada).

Para cada caso, levando-se em consideração somente as construções de poços convencionais, foi calculada a razão entre o tamanho do revestimento (valores no círculo claro) e a dimensão do poço aberto (valores no círculo cinza), desde um revestimento de 4 polegadas até 30 polegadas de diâmetro externo. O cálculo da média aritmética das respectivas razões para todas as combinações possíveis, entre os tamanhos do revestimento e dimensões de poço aberto, resultou em 0,80, com um desvio padrão de 0.024. Os valores dos extremos máximos e mínimos, dentre as 20 combinações possíveis, foram respectivamente de 0.84 e 0.73, pelos quais 5 resultaram exatamente em 0.80. Esta relação será importante para definirmos um comprimento característico para o cálculo do parâmetro geométrico adimensional que definirá os domínios do anular do problema na direção da coordenada radial de nosso estudo.

Mesmo assim, uma investigação da influência de diferentes aberturas anulares na eficiência de deslocamento será investigada para alguns parâmetros de controle.

As propriedades físicas dos fluidos utilizados para o deslocamento de fluido de perfuração podem variar significativamente e a escolha das propriedades reológicas e da densidade do sistema de fluidos espaçadores dependem de diversos fatores, os quais estão relacionados com o tipo de formação geológica, regime de bombeio e propriedades do fluido a ser deslocado.

De acordo com NELSON (1990) [1] e LAVROV & TORSÆTER (2016) [3], valores da densidade dos sistemas fluidos espaçadores podem variar de 1030 kg/m^3 (8.60 ppg) até 1870 kg/m^3 (15.60 ppg).

Do ponto de vista reológico, espaçadores e pastas de cimento são fluidos não newtonianos. Estes fluidos têm uma tensão limite de escoamento, significando que uma tensão de cisalhamento acima de um determinado valor limite deve ser aplicada para iniciar a movimentação do sistema de cimentação. Implicando que, em um anular, um determinado gradiente de pressão deverá ser aplicado para que o deslocamento seja iniciado. Quando a tensão de cisalhamento está acima da tensão limite de escoamento, a pasta se comporta como um fluido viscoso. Modelos reológicos simplificados, como o modelo de

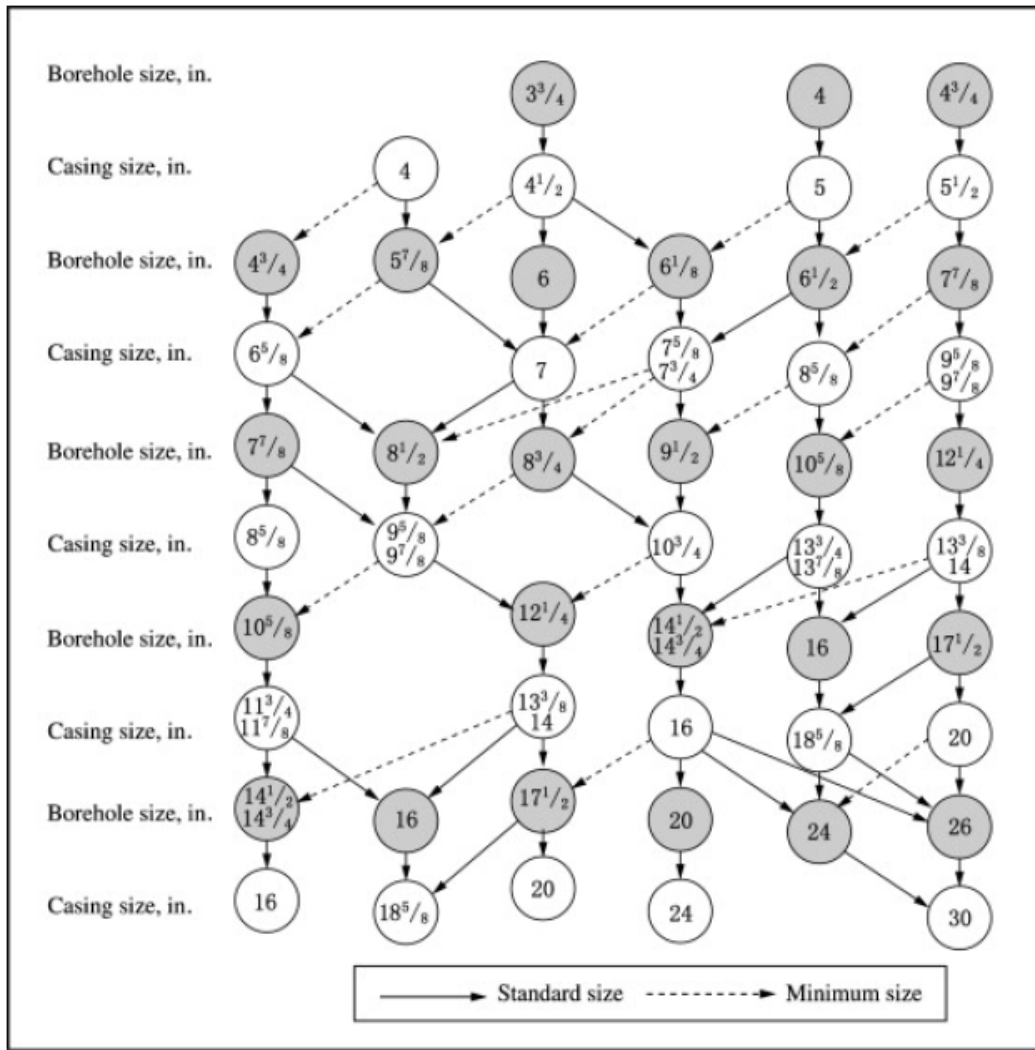


Figura 1.3: Diversas combinações entre poço aberto e tamanho de revestimento de produção utilizadas na cimentação de poços de petróleo, cf. WAN (2011) [15]

Bingham são utilizados para descrever este comportamento. NELSON (1990) [1] e LAVROV & TORSÆTER (2016) [3].

Propriedades reológicas de espaçadores utilizados no processo de deslocamento podem ser desenhadas de forma a apresentar uma tensão limite de escoamento na ordem de $1 - 100 \text{ Pa}$ e uma viscosidade plástica na ordem de $\mu_1 = 0.01 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (10 cp) até aproximadamente $0.10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (100 cp), a depender da temperatura e pressão do poço. NELSON (1990) [1] e LAVROV & TORSÆTER (2016) [3].

De acordo com PARVINDER et al. (2017) [8], as propriedades reológicas e densidades do fluido de perfuração, espaçador e pasta de cimento exercem um papel vital para o desempenho do deslocamento, eficiência e qualidade da cimentação primária. Ao projetar o sistema espaçador, a reologia e densidade

devem ser otimizadas segundo parâmetros determinados pelas especificações do fluido de perfuração e pasta de cimento. Idealmente, a reologia e densidade do espaçador devem ser maiores que as do fluido de perfuração e menores que as da pasta de cimento na temperatura de circulação de fundo do poço para minimizar a contaminação de fluidos e futura deterioração do poço.

NELSON (1990) [1] cita modelos teóricos e estudos realizados por GRAHAM [9] (1972) e JAMOT (1974) [10], considerando que melhores resultados no deslocamento do fluido de perfuração são obtidos quando a densidade do fluido de perfuração é significativamente menor, apontando diferenças na ordem de 500 kg/m^3 (4.17 ppg) em relação à densidade dos espaçadores. Essa recomendação é válida para escoamentos em regime laminar. Para escoamentos turbulentos, a diferença pode ser menor, na ordem de 200 kg/m^3 (1.67 ppg).

Também segundo NELSON (1990) [1], fluido de perfuração com densidades menores que 1437 kg/m^3 (11,99 ppg) são definidos como fluidos leves (*light weight mud*) e fluidos de perfuração com densidades maiores que 2037 kg/m^3 (17.00 ppg) são denominadas fluidos pesados (*heavy weight mud*), podendo chegar a 2160 kg/m^3 (18.03 ppg) em alguns casos.

Com o objetivo de facilitar sua remoção, a redução da densidade do fluido de perfuração pode ser alcançada através da adição de água ou dispersantes.

As viscosidades esperadas para fluidos de perfuração, se encontram em um intervalo entre: $\mu = 0.005 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (5 cp) a $\mu = 0.03 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (30 cp).

Com o propósito de utilizar valores dos parâmetros próximos aos encontrados nas operações industriais de construção de poços, consideraremos valores de viscosidades e densidades conforme os intervalos mostrados na tabela 1.1. Os valores dos parâmetros adimensionais que surgem nas equações de movimento em nosso trabalho, i.e., número de *Reynolds* (Re), número de *Péclet* (Pe), fator gravitacional (F) e razão de viscosidades ($\eta = \mu_2/\mu_1$) serão definidos a partir dos valores dessa tabela. A tabela 1.1 compreende dados coletados de diversas referências da literatura especializada : [1], [3], [9], [10], [11], [12], [13], [14] e [15]. Maiores detalhes a respeito de cada parâmetro adimensional serão abordados nos capítulos subsequentes.

Tabela 1.1: Parâmetros operacionais selecionados para utilização nas simulações.

Parâmetro Operacional	Min	Max
Vazão de Bombeio (bpm)	0.80	6.80
Densidade do Fluido Deslocador (kg/m^3)	1030	1577
Densidade do Fluido Deslocado (kg/m^3)	1437	2037
Viscosidade do Fluido Deslocador ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	0.010	0.100
Viscosidade do Fluido Deslocado ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	0.005	0.300

Há uma diversidade significativa de métodos e técnicas empregadas nas operações de cimentação primária de poços associadas a uma ampla gama de tipos de pastas de cimento e sistemas espaçadores, com diferentes densidades e propriedades reológicas especificamente desenhadas para facilitar o processo de deslocamento do fluido de perfuração. Todo este processo está diretamente correlacionado a uma infinidade de ambientes de poços, com diferentes variações de geometria, regimes de escoamento, pressões, temperaturas e tipos de formações geológicas que definem as condições das operações. Tamanha complexidade do problema, relacionado à operação de cimentação, constitui um enorme desafio com o objetivo de analisar as particularidades verificadas durante o escoamento multifásico que ocorre durante o deslocamento do fluido de perfuração pelo sistema de cimentação primária e seus sistemas de fluido. É importante salientar que o trabalho abrange uma porção limitada das inúmeras aplicações possíveis utilizadas em campo.

1.4 **Técnicas Empregadas**

Segundo LAVROV & TORSATER (2016) [3], uma operação de cimentação bem-sucedida dependerá da relação correta entre as densidades e reologias dos fluidos, taxas de bombeio e volumes de injeção utilizados. Na indústria, devido a limitações logísticas ou de viabilidade econômica, nem sempre será possível conciliar o estado da arte da técnica com a realidade operacional e economicidade de cada projeto, portanto, é fundamental a utilização de algum tipo de ferramenta que permita a otimização destes recursos através da utilização de técnicas e modelos que simulem cada ambiente específico de poço em busca da cimentação primária adequada e de acordo com os objetivos técnicos e econômicos do projeto. É possível que esta otimização de recursos seja alcançada através de modelagem numérica, simulações e estudos computacionais realizados durante a fase de planejamento da construção do poço.

LAVROV & TORSATER (2016) [3] descrevem um modelo cinemático unidimensional, onde o anular é discretizado através de fatias ao longo do poço e cada fatia é então discretizada por um número finito de seções. Nos modelos cinemáticos, o anular é discretizado em tubos dispostos ao longo da direção angular. O anular é assim efetivamente representado como uma coleção de seções/tubos 1-D. O fluxo e o deslocamento são calculados em cada seção/tubo, pelo qual, possíveis transferências de massa e momento entre os tubos tornam qualquer fluxo azimutal impossível de ocorrer. Tais modelos cinemáticos simplificados descrevem de maneira conservadora o comportamento físico de uma cimentação primária e sua eficiência durante um escoamento bifásico. Este tipo

de modelo analítico foi descrito de forma pioneira por MCLEAN et al. (1967) [16]. Figura 1.4.

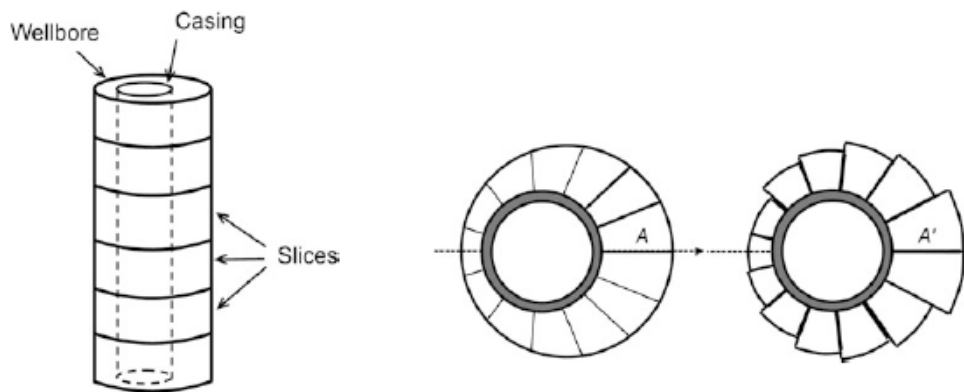


Figura 1.4: [3] Discretização do anular em fatias ao longo do poço para modelagem de escoamento anular através de um modelo cinemático simples.

Já para modelos bidimensionais, o anular é discretizado através de células ao longo do eixo do poço e ao longo da direção azimutal, ou ao longo do eixo do poço e ao longo da direção radial. Os modelos bidimensionais podem descrever os fenômenos associados aos efeitos de gravidade e difusividade, além de capturar os perfis de velocidade e concentração nas direções azimutais e/ou radiais. Como exemplo, BITTLESTON et al. (2002) [2] analisaram o fenômeno da remoção de fluido de perfuração e posicionamento do cimento através de um modelo numérico por meio de um deslocamento laminar de um fluido não-newtoniano numa célula de *Hele-Shaw* anular excêntrica.

Em modelos 3-D tridimensionais, a discretização do anular é efetuada em todas as três dimensões. Modelos numéricos tridimensionais 3-D permitem a captura da física do problema com maiores detalhes, bem como descrevem diferentes fenômenos hidrodinâmicos relacionados com diferentes situações operacionais. Contudo, estão aliados à existência de um aumento dos custos computacionais. BIEZEN et al. (2000) [17] realizaram experimentos laboratoriais e utilizaram um modelo tridimensional para realização de estudos numéricos para a remoção de fluido de perfuração de poços horizontais. SAVERY et al. (2007) [18] desenvolveram um simulador tridimensional com capacidade de modelar perfis de concentração e campos de velocidade de escoamento em poços com alta excentricidade, concomitante a reciprocção e rotação do revestimento.

A abordagem numérica da presente dissertação utiliza um código numérico desenvolvido em linguagem C, que resolve as equações de *Navier-Stokes*

com viscosidade variável em coordenadas cilíndricas acopladas a uma equação de advecção e difusão para um campo escalar que mede a concentração do fluido deslocado. A discretização das equações de movimento foram realizadas usando diferenças finitas combinando as técnicas de *Adams-Bashforth*, *Runge-Kutta* e *Crank-Nicolson* para as discretizações temporais. Para a discretização espacial, utiliza-se métodos centrais para os termos difusivos e uma técnica *upwind* de quinta ordem para os termos não lineares. O cálculo do campo de pressão é feito usando o método da projeção e usando métodos espectrais. A visualização gráfica é feita através do *MatLab*.

Esta abordagem numérica é fundamentada através dos estudos realizados por OLIVEIRA & MEIBURG (2011) [19], OLIVEIRA & MEIBURG (2017) [20], JOHN et al. (2013) [21], HEUSSLER et al. (2014) [22] e OLIVEIRA & MEIBURG (2013) [23], que apresentam e discutem simulações numéricas tridimensionais (DNS) das equações de *Navier-Stokes* para deslocamentos miscíveis viscosamente instáveis em células de *Hele-Shaw*. Em seu trabalho, OLIVEIRA et al. (2011) [19], acompanha RAI & MOIN, (1990) [24], empregando um método das diferenças finitas em três passos e um método de discretização híbrido *Runge-Kutta/Crank-Nicolson* para a solução das equações de conservação da massa, equações do momento linear e da concentração.

1.5

Referências Bibliográficas

Alguns trabalhos científicos recentes estudaram o comportamento hidrodinâmico do deslocamento do fluido de perfuração por um sistema de cimentação. Dentre eles destacamos os estudos realizados por NACCACHE et al. (2018) [7], apresentando um estudo numérico sobre o deslocamento de dois fluidos através de um duto vertical contendo um alargamento abrupto na seção transversal.

A resolução das equações governamentais de conservação de massa e momento para este problema de fluxo axissimétrico bifásico foi abordada através da utilização de métodos de volumes finitos. Foram discutidos diversos padrões de fluxo ao longo da irregularidade e a eficiência de deslocamento para diferentes pares de fluidos: (caso 1) fluido visco-plástico deslocando um fluido newtoniano, (caso 2) fluido newtoniano deslocando um fluido visco-plástico e (caso 3) um fluido visco-plástico deslocando um segundo fluido visco-plástico.

Os autores observaram que o deslocamento é mais efetivo em regiões erodidas mais longas, observando também que efeitos inerciais (número de *Reynolds* maiores) tendem a deslocar a interface entre os fluidos em direção à parede da contração da seção irregular, resultando em menores eficiências de

deslocamento. Em seu trabalho, os autores utilizaram duas formas de cálculo da eficiência de deslocamento: tradicionalmente, através da razão entre a área ocupada pelo fluido injetado e a área total da região erodida, e através de um fator de simetria do escoamento no interior da região erodida. Este último é calculado através da diferença entre as áreas ocupadas pelo fluido de injeção na metade, a jusante da região erodida, e a área total ocupada pelo volume injetado, em relação à área total da irregularidade da seção transversal.

ETRATI et al. (2020) [25] estudam os efeitos do comprimento dos *washouts*, taxas de bombeio, diferença entre densidades e razões entre viscosidades durante o deslocamento do fluido de perfuração por um sistema espaçador representando a cimentação de um poço vertical, através da análise dos resultados de simulações computacionais 3D. Os autores utilizaram 6 pares de fluidos (deslocamento *Newton-Bingham*) analisando os efeitos do deslocamento com fluidos de diferentes densidades, razões entre viscosidades e em função de diferentes taxas de bombeio e outras condições.

Os resultados obtidos mostram que o aumento da taxa de bombeio tem efeitos diversos no deslocamento bifásico. À medida que o número de *Reynolds* é aumentado, a interface de mistura é deslocada para a saída do *washout*. Em simulações com número de *Reynolds* suficientemente altos, o fluxo se desestabiliza dentro do *washout*, concluindo que este processo poderá ou não melhorar o processo de deslocamento. Por outro lado, para tempos maiores de bombeio, a mistura poderá diluir progressivamente o fluido deslocado, removendo um maior volume deste fluido do interior do *washout*. A partir das análises do parâmetro de *Reynolds*, os autores concluem que números de *Reynolds* maiores não resultam necessariamente em melhores taxas de remoção de fluido de perfuração.

Os autores mostram também que, o aumento da diferença entre densidades (sempre utilizando um fluido deslocador mais pesado que o deslocado) tem um efeito significativamente positivo no deslocamento do fluido de perfuração, mesmo para diferenças menores que 10%. Já no caso da utilização de diferentes viscosidades do fluido injetado, as diferenças na melhoria do deslocamento são mínimas, para a faixa de viscosidades utilizadas no trabalho.

MCLEAN et al. (1967) [16] realizaram diversas investigações de forma pioneira sobre o mecanismo de deslocamento do fluido de perfuração, através de experimentos e modelos analíticos, no anular de revestimentos excêntricos em relação ao poço aberto. Os autores utilizaram um modelo analítico cinemático baseado na divisão do anular em setores para a investigação numérica. Como conclusão, o trabalho mostra que, o sistema de cimentação, idealmente, deve ser mais viscoso que o fluido de perfuração, com o objetivo de prevenir *by-passing*

do fluido de perfuração a ser deslocado. Ao menos que, o deslocamento do fluido de perfuração seja auxiliado por algum processo de movimentação do revestimento (reciprocção ou rotaçção).

Quanto maior a excentricidade, maior deverá ser a diferença entre viscosidades. Adicionalmente, números de *Reynolds* suficientemente altos, dentro do envelope de regime turbulento, podem diminuir a eficiência do deslocamento, com a tendência do sistema de cimentação trespassar (*bypass*) a região compreendida pelo fluido de perfuração.

BITTLESTON et al. (2002) [2] apresentaram uma série de resultados computacionais através de um modelo bidimensional de deslocamento de *Hele-Shaw* em um anular excêntrico. As simulações ilustram o mecanismo pelo qual o fluido de perfuração residual poderá ocorrer ao longo de um escoamento através de um anular estreito. Outras simulações descrevem que deslocamentos estáveis em estado estacionário podem ocorrer em determinadas circunstâncias e captura alguns aspectos da complexidade ocorrida durante as operações de cimentação reais.

YTREHUS et al. (2017) [26] realizaram investigações experimentais quanto ao deslocamento de fluidos através de anulares concêntricos e excêntricos (fluido de perfuração sendo deslocado pelo sistema de fluidos de cimentação), utilizando um aparato horizontal de 10 m com um tubo externo de $6\frac{1}{2}$ pol de diâmetro interno e um tubo concêntrico de $5\frac{1}{2}$ pol de diâmetro externo, com possibilidade de rotaçção em relaçção ao aparato externo. Os resultados demonstraram que a rotaçção da coluna interna beneficia o processo de deslocamento. Resultados também mostram que, no caso de tubos concêntricos, a frente de deslocamento é altamente afetada pelos efeitos gravitacionais. Enquanto que, durante o deslocamento através do anular de tubos excêntricos, a seçção do anular mais estreito apresenta uma baixa movimentação de fluido. Os autores também confirmaram que a movimentação do revestimento auxilia o deslocamento bifásico do fluido de perfuração pelo cimento.

SAVERY et al. (2007) [18] desenvolveram um modelo em coordenadas cilíndricas tridimensional utilizando diferenças finitas que simula o processo de mistura durante o deslocamento entre fluidos em um anular altamente excêntrico, adicionando os efeitos de reciprocção e rotaçção do revestimento. O simulador 3-D, ainda em desenvolvimento, fornece fundamentos para modelar vários aspectos do deslocamento do fluido de perfuração, incluindo fatores chave como: excentricidade entre anulares, mistura e interface entre fluidos e a possibilidade de movimentação do revestimento.

RENTERIA et al. (2019) [27] descreveram os efeitos de irregularidades durante o fluxo de deslocamento no decorrer de uma operação de cimentação

primária de poços altamente desviados. Os estudos investigam os efeitos de *washouts* no decorrer da remoção de fluido de perfuração através de análises experimentais e simulações computacionais bidimensionais.

Um total de oito experimentos, dos quais dois com excentricidade, quatro ângulos de inclinação e uma variedade de reologias, foram realizados com dois fluidos com propriedades representativas de fluido de perfuração e cimento (ou espaçador), deslocados através de um fluxo constante ao longo de um anular com 10m de comprimento, contendo um alargamento radial *washout*.

Os experimentos foram complementados através de simulações computacionais 2D, estudando os efeitos do comprimento e diâmetro do *washout*, para ambas configurações, concêntrica e excêntrica, todos orientados horizontalmente.

Os autores descobriram que o aumento do diâmetro do *washout* sempre reduz a eficiência do deslocamento, para ambas configurações entre poço aberto e revestimento (concêntrica e excêntrica). O aumento do comprimento do *washout* é menos claro, apontando para uma possível melhora da eficiência. Para todos os casos, é evidente o risco potencial de contaminação do sistema de cimentação na área do *washout*.

ZARE et al. (2017) [28] apontaram os efeitos do empuxo na formação de micro anulares na parede do anular através do deslocamento de um fluido de *Bingham* por um fluido newtoniano através de um anular estreito orientado verticalmente, empregando diferentes parâmetros de relação entre viscosidades, número de *Bingham*, número de *Froude* e *Reynolds*.

O modelo bidimensional 2-D utiliza um método computacional para discretização numérica que mescla elementos finitos e volumes finitos com a inclusão dos termos de empuxo, simplificando o modelo matemático com a utilização das aproximações: *Large Péclet Approximation* e *Boussinesq Approximation* nas equações que governam o deslocamento da mistura.

Os resultados obtidos demonstram que, ao aumentar a razão entre as viscosidades, aumenta-se a formação de micro anulares nas paredes do anular. Aumentando-se os parâmetros relacionados com empuxo, diminui-se a formação de micro anulares, aumentando a eficiência do deslocamento. Aumentando-se o parâmetro correspondente a razão entre a tensão limite de escoamento do fluido deslocado e a tensão viscosa do fluido deslocador, denominada como número *Newton-Bingham*, diminui-se a formação de micro anulares (para baixos a moderados empuxos). Para valores elevados de empuxo, a camada residual é também diminuída.

ROUSTAEI et al. (2015) [5] realizaram estudos computacionais sobre o escoamento de um fluido de *Bingham* ao longo de um canal estreito plano,

contendo uma irregularidade expandida, através da solução das equações de movimento e conservação da massa, considerando escoamentos não-inerciais ($Re = 0$), analisando estes efeitos da geometria com variações paramétricas, na formação de áreas com fluido estático e na redução do diferencial de pressão do escoamento.

Uma seção irregular do canal representa um *washout* de um poço de petróleo prestes a ser cimentado, durante uma operação de condicionamento do fluido de perfuração. Através do estudo de diferentes tipos de geometrias de *washouts*, o trabalho teve o objetivo de prover uma análise dos efeitos da circulação do fluido de perfuração através de diversas geometrias, possibilitando a apresentação de previsões quantitativas.

Os autores mostraram que, no caso de *washouts* relativamente profundos, com fluidos com tensões limite de escoamento altas, o fluido se comporta de forma a "auto-selecionar" a região de escoamento de uma forma independente da geometria do *washout*.

Em complemento a este estudo, na segunda parte deste trabalho, ROUS-TAEI et al. (2015) [6] estendem a abordagem anterior para escoamentos inerciais laminares estacionários. Os autores investigaram os efeitos da variação dos números de *Bingham* e *Reynolds* ($10 \leq Re \leq 500$) no comportamento hidrodinâmico do escoamento.

O aumento do número de *Reynolds* resulta no aumento de regiões com fluido estático. Os autores concluem que estes resultados são importantes para indústria, uma vez que, a percepção usual, porém nem sempre verdadeira, é a de que: a eficiência do condicionamento será beneficiada através do aumento da vazão.

ZHANG et al. (2022) [29] investigaram o processo de deslocamento helicoidal (presença de velocidades azimutais), induzido por um centralizador helicoidal, através de *washouts*, durante a cimentação primária de poços verticais.

O trabalho aborda o problema através da utilização de um método computacional de dinâmica de fluidos, adotando um modelo *VOF* (*volume of fluid*) para a resolução das equações governamentais e simulação deste escoamento multifásico.

Em seu trabalho, os autores citam as principais conclusões: (1) Dispersão e migração radial da velocidade são mais pronunciadas na região da entrada do *washout*. (2) Velocidades radiais e tangenciais induzidas por centralizadores resultam em transporte de fluido na direção da parede do *washout*, imediatamente após sua entrada na irregularidade, resultando em um aumento da mistura entre os fluidos e dificultando sua remoção. (3) A dinâmica do fenô-

meno de deslocamento é diferente para deslocamentos espirais e não-espirais. (4) A utilização de fluidos de deslocamento mais pesados beneficiam o processo de deslocamento. (5) O aumento do fluxo espiral tem um efeito monotônico em relação à eficiência do deslocamento através do *washout*. (6) Aumento do comprimento e diâmetro do *washout* têm um efeito benéfico na eficiência de deslocamentos espirais.

RENTERIA et al. (2019) [30] estudaram os efeitos de irregularidades durante o deslocamento de fluido de perfuração em poços altamente desviados. Eles utilizaram recursos laboratoriais e simulações computacionais 2-D, com o objetivo de identificar os principais parâmetros de controle para este tipo de deslocamento e seus efeitos.

Diversos experimentos foram realizados com 2 fluidos com propriedades representativas do fluido de perfuração e cimento (ou espaçador). O experimento consiste em bombear um fluido a vazão constante através de um anular constante de 10 m de comprimento, posicionado em inclinações quase horizontais.

Em relação aos efeitos na eficiência do deslocamento devido ao *washout*, os autores concluem através de experimentos e simulações 2-D, que um aumento do comprimento da irregularidade poderá, surpreendentemente, beneficiar o deslocamento.

1.6

Estrutura da Dissertação

Esta dissertação se estrutura da seguinte forma: No capítulo 2 serão demonstradas as características básicas do problema, detalhando o modelo geométrico axissimétrico simplificado do problema. Ainda neste mesmo capítulo, serão apresentadas as equações que governam a hidrodinâmica do escoamento, suas equações adimensionais e parâmetros adimensionais utilizados. Em seguida será apresentado um estudo de passo de tempo das simulações e uma análise de densidade de malha. No capítulo 3 serão apresentados os resultados das simulações, e as respectivas análises realizadas através da variação dos parâmetros de escoamento, densidade e viscosidades dos fluidos, e uma discussão da influência de cada parâmetro de controle feito de forma sistematizada. No capítulo 4 serão apresentadas as considerações finais.

2

Modelagem Matemática

Neste capítulo iremos discutir toda a estratégia utilizada para a abordagem matemática do problema. Além do debate a respeito do enfoque matemático, o presente capítulo fornecerá todo substrato analítico que sustentará o tratamento numérico do problema através das simulações numéricas. Subsequentemente, nos capítulos posteriores, debateremos sobre os resultados obtidos e os benefícios para a indústria.

Nosso estudo está focado em uma configuração que considera o deslocamento entre dois fluidos newtonianos miscíveis através de uma seção irregular (*washout*), no anular entre revestimento e o poço aberto. Contudo, a abordagem completa deste tipo de problema industrial é extremamente complexa, o que tornaria qualquer estudo sistemático do problema extremamente complexo. Desta forma, simplificamos a questão do deslocamento entre dois fluidos newtonianos miscíveis, através de um sistema mais simples, que permite um estudo representativo e amplo dos principais efeitos físicos e suas possíveis consequências práticas.

ROUSTAEI et al (2015) [5] investigaram através de estudos numéricos, o comportamento do escoamento de fluidos de *Bingham* através de um anular contendo um *washout* com diferentes configurações geométricas. Os estudos concluem que, para um *washout* suficientemente profundo, a geometria da irregularidade torna-se irrelevante, sendo a geometria retangular a mais representativa.

Em nosso trabalho, adotaremos portanto, um *washout* retangular simples, através da expansão do anular entre o revestimento e o poço aberto.

As seguintes hipóteses são consideradas como forma de simplificação do problema:

- ▷ Utilização de simulações numéricas diretas (DNS) das equações de *Navier-Stokes*;
- ▷ Regime transiente;
- ▷ A geometria é axissimétrica bidimensional em coordenadas cilíndricas;
- ▷ Os fluidos são incompressíveis;

- ▷ Os fluidos são miscíveis;
- ▷ Os fluidos são newtonianos;
- ▷ A irregularidade será representada por um *washout* simplificado retangular;
- ▷ Bombeio a vazão constante: No instante $t = 0$, o *Fluido 1* (fluido azul da figura 2.1) será injetado a uma vazão constante com perfil de velocidades desenvolvido;
- ▷ Inicialmente será considerado que todo o espaço anular, bem como toda a irregularidade, estará preenchido com um *Fluido 2* (fluido amarelo da figura 2.1);
- ▷ Inexistência de excentricidade entre revestimento e poço aberto: O escoamento é na direção vertical no sentido ascendente;

A figura 2.1 ilustra as condições iniciais do problema em coordenadas cilíndricas, mostrando a condição geométrica axissimétrica, o início do *washout*, localizado em $z = 3,50$ e sua profundidade em $r = 1,20$. O perfil da velocidade plenamente desenvolvido fluindo através de dois tubos concêntricos $0 \leq r \leq 1$, a miscibilidade entre os fluidos e o início da irregularidade. Graficamente, o fluido injetado, *Fluido 1*, é representado pela cor azul e o fluido deslocado, *Fluido 2*, está representado pela cor amarela.

As condições iniciais e de contorno serão abordadas com maiores detalhes nas próximas seções do trabalho.

2.1

Abordagem Geométrica e Condições Iniciais e de Contorno do Problema

Empregando abordagens compatíveis a outros trabalhos, contudo adicionando a miscibilidade entre os fluidos utilizados e a resolução das equações governamentais em coordenadas cilíndricas, o objetivo deste trabalho será o estudo sistemático de como o comportamento hidrodinâmico do fenômeno de deslocamento de fluidos miscíveis em anulares com expansão abrupta pode ser afetado por diferentes ambientações geométricas, taxas de injeção (número de *Reynolds*), miscibilidade entre os fluidos (número de *Péclet*) e suas densidades e viscosidades.

O modelo geométrico utilizado é baseado em uma simplificação do problema através do emprego de uma geometria que simula a ocorrência de um *washout* durante o processo de cimentação primária de um poço vertical. (fig 2.2, baseada em ilustração de ETRATI et al. (2020) [25]).

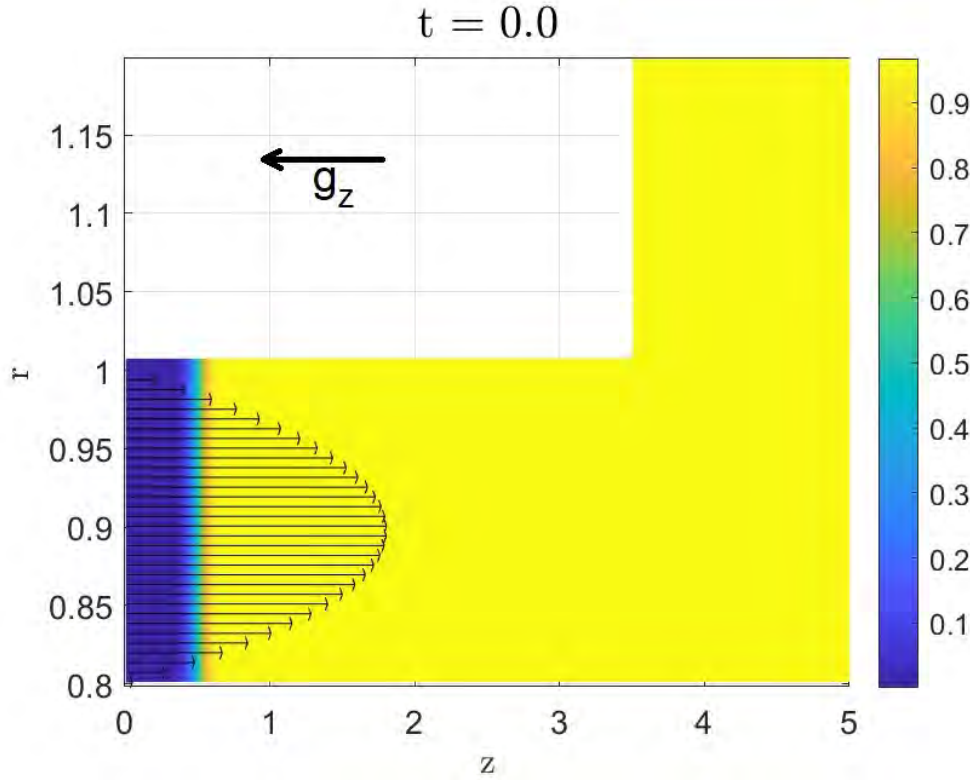


Figura 2.1: Figura ilustrando as condições iniciais das simulações do modelo 2-D abordadas.

O modelo geométrico 2-D (ver figura 2.2) utiliza uma seção transversal cilíndrica axissimétrica, no qual R_{int} representa o raio interno do anular do poço, que é o raio externo do revestimento concêntrico e um raio externo R_{ext} , que corresponde ao poço aberto, contendo uma irregularidade na seção transversal ou expansão abrupta (*washout*), com dimensões na direção axial, z , de comprimento L e profundidade H na direção radial, r . O *Fluido 1* representa o fluido deslocador com viscosidade μ_1 é injetado com um perfil de velocidade desenvolvido, $v_z(r)$, e o *Fluido 2* representa o fluido a ser deslocado do anular entre o poço aberto e o revestimento.

O perfil desenvolvido da velocidade $v_z(r)$ de um líquido fluindo através de um espaço anular entre dois cilindros concêntricos é representado pela expressão (2-1), cf. figura 2.3:

$$v_z(r) = \frac{1}{4\mu} \left(-\frac{dp}{dz} \right) R^2 \left[1 - \frac{r^2}{R^2} - (1 - k^2) \frac{\ln(r/R)}{\ln(k)} \right]. \quad (2-1)$$

Na equação 2-1, $R = R_{ext}$ é o raio externo do anular, e $kR = R_{int}$ é o raio interno. Integrando a expressão (2-1) de $kR(R_{int})$ a $R(R_{ext})$ obtém-se a velocidade média U :

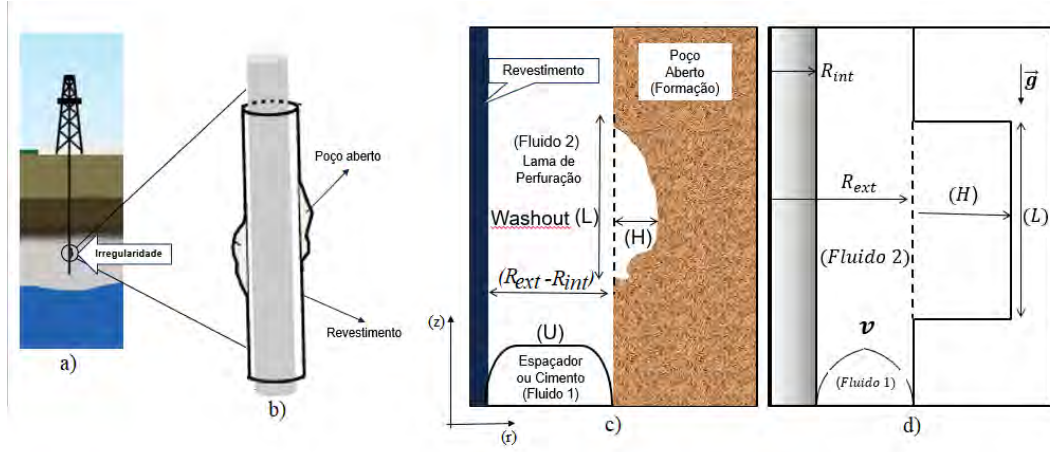


Figura 2.2: Ilustração de um *washout* localizado no anular de um poço vertical cimentado : a) Esquema de um poço vertical. b) Imagem ampliada ilustrando a irregularidade. c) Seção longitudinal axissimétrica 2-D simplificada. d) Modelo geométrico axissimétrico 2-D simplificado do tipo *square wave*.

$$\begin{aligned}
 U &= \frac{1}{\pi R^2(1 - k^2)} \int_{kR}^R v_z 2\pi r dr \\
 &= \frac{1}{8\mu} \left(-\frac{dp}{dz} \right) \frac{R^2}{(1 - k^2)} \left[(1 - k^4) + \frac{(1 - k^2)^2}{\ln k} \right]
 \end{aligned} \quad (2-2)$$

A velocidade média e o raio externo serão utilizados como escalas de velocidade e comprimento, respectivamente. Assim, as grandezas adimensionais serão dadas por:

$$v_z^* = \frac{v_z}{U}, \quad v_r^* = \frac{v_r}{U} \quad (2-3)$$

e

$$z^* = \frac{z}{R}, \quad r^* = \frac{r}{R} \quad (2-4)$$

Usando as expressões 2-1 e 2-2, obtém-se a expressão devidamente adimensionalizada do perfil desenvolvido da velocidade, $v_z^*(r)$, que será utilizada no código numérico como condição inicial de injeção:

$$v_z^*(r) = 2 \frac{1 - r^2 - (1 - k^2) \frac{\ln r}{\ln k}}{\frac{1 - k^4}{1 - k^2} + \frac{1 - k^2}{\ln k}}. \quad (2-5)$$

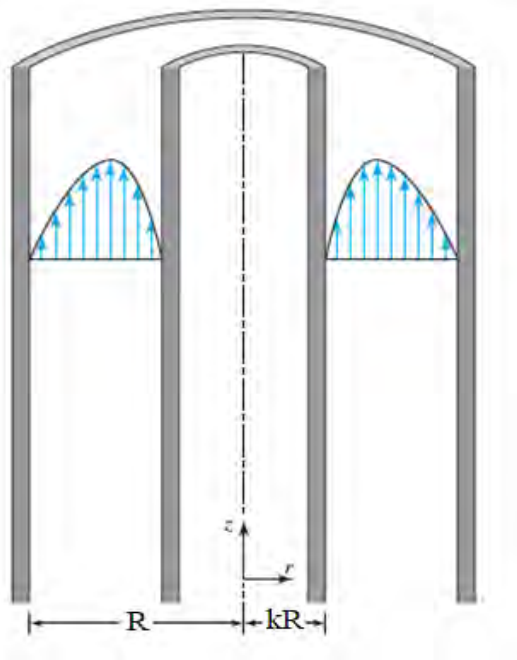


Figura 2.3: Figura representando o perfil desenvolvido da velocidade $v_z(r)$ em um anular concêntrico

As simulações dos deslocamentos e as análises hidrodinâmicas são realizadas a partir do modelo geométrico simplificado da figura 2.2 d). No início das simulações, todo o domínio geométrico está preenchido com um fluido a ser deslocado, *Fluido 2*. A partir do tempo $t = 0$, um fluido deslocador *Fluido 1*, com diferentes densidade e viscosidade do fluido deslocado, *Fluido 2*, é injetado, e deste momento em diante, o fluido *Fluido 1* realiza o deslocamento gradativo do *Fluido 2*.

2.1.1

Resumo das Condições Iniciais e de Contorno

Um resumo das condições iniciais e de contorno utilizados no problema são listados abaixo:

- (1) Em $t = 0$, o domínio está preenchido por um *Fluido 2* (em amarelo) de concentração $c = 1$, a ser substituído por um *Fluido 1* injetado (Em azul), com concentração $c = 0$;
- (2) Na entrada do escoamento, o *Fluido 1* é injetado com vazão constante e perfil desenvolvido;
- (3) Condição de saída convectiva;
- (4) Considera-se uma condição de não deslizamento, ou seja, $v_z = 0$ e $v_r = 0$;

- (5) Aplica-se uma condição de contorno de *Neumann* para a concentração, a partir do qual o fluxo de partículas é nulo para: $\frac{\partial c}{\partial r}(r = \text{paredes}, t) = 0$, condição de total impermeabilidade;

2.1.2

Equações Governamentais

De forma a satisfazer a hidrodinâmica do escoamento, resolvemos o sistema composto pelas equações do momento de *Navier-Stokes* com viscosidade variável, equação da conservação da massa e equação advectivo-difusiva para um campo escalar que representa a concentração do fluido deslocado. Essas equações são dadas por:

$$\rho \left(\frac{D\mathbf{v}}{Dt} \right) = -\nabla p - \nabla \cdot \tau + \rho \mathbf{g}, \quad (2-6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (2-7)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla c = D(\nabla^2 c), \quad (2-8)$$

onde \mathbf{v} é o vetor campo de velocidades, τ representa o tensor das tensões viscosas, ρ é a densidade e \mathbf{g} é a aceleração da gravidade. Para a equação advectivo-difusiva, c representa o campo escalar da concentração e D é o coeficiente de difusividade. LEAL, G.L. (2003) [31] e LANDAU & LIFSHITZ (1959) [32].

O escoamento, por ser na direção vertical, com fluxo no sentido ascendente, estará submetido à uma aceleração da gravidade $\mathbf{g} = -g\hat{z}$, onde \hat{z} representa o vetor unitário na direção do eixo z .

Conforme configurado pelo problema, serão adotadas condições hidrodinâmicas e geométricas axissimétricas, desprezando qualquer escoamento azimutal, que por consequência, tornam nulas quaisquer variações azimutais, θ , bem como a componente v_θ da velocidade, conforme indicado nas equações (2-9) e (2-10).

$$v_\theta = 0 \quad (2-9)$$

$$\frac{\partial}{\partial \theta} = 0 \quad (2-10)$$

Utilizamos um modelo de fluido único, no qual uma única equação de *Navier-Stokes* é resolvida para descrever a dinâmica de ambos os fluidos e suas propriedades variam no espaço e é na interface entre os fluidos que estas

propriedades variam subitamente. Nesta abordagem para fluidos miscíveis e incompressíveis, a função viscosidade é variável e está correlacionada ao campo escalar c , que mede a concentração do fluido residente, 2. Quando este fluido está puro, este se encontra com uma concentração $c = 1$. A entrada do domínio é definida com a injeção do *Fluido 1*, com concentração $c = 0$. Quaisquer valores intermediários entre $0 < c < 1$ podem ser usados para acessar a interface difusa entre os fluidos, ou seja, o campo de concentração rastreia cada um dos fluidos identificando a interface difusa entre eles. A lei governante que correlaciona viscosidade e concentração, $\mu(c)$, é necessária para interconectar as equações governantes. [33] [34] [37] [20] [35].

A correlação, $\mu(c)$, ideal irá depender da escolha do par de fluidos e a função utilizada para deslocamentos miscíveis envolvendo fluidos newtonianos é a exponencial, dada por (2-11):

$$\mu(c) = \mu_1 e^{\eta c}. \quad (2-11)$$

Na equação (2-12), η é um dos parâmetros de controle adimensionais do nosso problema e representa a razão entre as viscosidades em escala logarítmica, onde μ_1 é a viscosidade dinâmica do fluido injetado e μ_2 , a do fluido deslocado:

$$\eta = \ln \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} \right). \quad (2-12)$$

Esta correlação exponencial entre viscosidade e concentração já foi utilizada por diversos autores, incluindo: OLIVEIRA & MEIBURG (2011) [19], JOHN et al. (2013) [21], HEUSSLER et al. (2014) [22], OLIVEIRA & MEIBURG (2013) [23], TAN & HOMSY (1988) [36], GOYAL & MEIBURG (2005) [37] e YORTSOS & ZEIBEK (1988) [38].

Considerando uma viscosidade variável e a axissimetria, os termos do tensor das tensões viscosas assumem as expressões conforme indicado abaixo:

$$\tau_{rr} = 2\mu \frac{\partial v_r}{\partial r}; \quad (2-13)$$

$$\tau_{\theta\theta} = 2\mu \frac{v_r}{r}; \quad (2-14)$$

$$\tau_{zr} = \tau_{rz} = \mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right); \quad (2-15)$$

$$\tau_{\theta r} = \tau_{r\theta} = 0; \quad (2-16)$$

$$\tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial v_z}{\partial z}; \quad (2-17)$$

$$\tau_{\theta z} = \tau_{z\theta} = 0. \quad (2-18)$$

Substituindo as expressões das componentes do tensor de tensões viscosas (2-13), (2-14), (2-15), (2-16), (2-17) e (2-18) nas equações do movimento de *Navier-Stokes* (2-6) em coordenadas cilíndricas e considerando a natureza axissimétrica do deslocamento, apresentamos as equações governamentais que regem a dinâmica do escoamento do problema considerado, conforme segue abaixo, para o componente v_r da velocidade:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial r} \left[2\mu \frac{\partial v_r}{\partial r} \right] + \\ \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right] + 2\mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial r} + \rho g_r \end{aligned} \quad (2-19)$$

Da mesma forma, define-se a segunda equação governamental do movimento para o componente v_z da velocidade:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(2\mu \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \\ \frac{\mu}{r} \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial r} + \rho g_z \end{aligned} \quad (2-20)$$

Para utilização no código numérico de forma mais eficiente, as equações governamentais são reescritas de forma adimensional, considerando as grandezas características indicadas abaixo:

$$v_r = Uv_r^*; \quad r = R_{ext}r^*; \quad p = \mu_1 \frac{U}{R_{ext}} p^*; \quad \mu = \mu_1 \mu^*; \quad (2-21)$$

$$v_z = Uv_z^*; \quad z = R_{ext}z^*; \quad t = \frac{R_{ext}}{U} t^*; \quad \rho = \rho_1 \rho^*$$

onde as variáveis $*$ são adimensionais; v_r e v_z são as componentes da velocidade ao longo dos eixos radial e axial, respectivamente; r corresponde a coordenada radial; z corresponde à longitude ao longo do domínio axial; t é a variável que definirá o caráter transiente do escoamento; p é a pressão; e μ é uma função viscosidade que captura as viscosidades dinâmicas de cada um dos fluidos e depende da concentração do fluido deslocado. Ela será determinada através da correlação (2-12), já anteriormente definida. R_{ext} define o raio do poço aberto usado como comprimento característico do problema; U é a velocidade característica e indica a velocidade média do bombeio do *Fluido 1* injetado; e ρ é uma função que correlaciona linearmente a densidade constante de cada um dos fluidos.

Substituindo-se as equações (2-21) nas equações do momento, obtém-se as equações governamentais escritas de forma adimensional. Desprezando o símbolo $*$, que denota adimensionalidade, as equações (2-22) e (2-23) abaixo, descrevem as velocidades nas direções radial r e axial z , respectivamente:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} = \\ & \frac{1}{R_e} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[2\mu \frac{\partial v_r}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right] + 2\mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial r} \right\} \end{aligned} \quad (2-22)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = \\ & \frac{1}{R_e} \left\{ \frac{\partial}{\partial z} \left[2\mu \frac{\partial v_z}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right] + \frac{\mu}{r} \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} + F \right\} \end{aligned} \quad (2-23)$$

Através das equações acima, é possível definir dois parâmetros adimensionais que controlam o escoamento, i.e., o número de *Reynolds* Re e o fator gravita-

cional F :

$$Re = \frac{\rho_1 U R_{ext}}{\mu_1} \quad (2-24)$$

$$F = \frac{\Delta \rho g R_{ext}^2}{\mu_1 U} \quad (2-25)$$

Onde, ρ_1 , é a densidade do fluido injetado, *Fluido 1*; U é a velocidade característica do fluido; R_{ext} é o diâmetro característico, que determina o raio do poço aberto; μ_1 é a viscosidade dinâmica do fluido injetado, *Fluido 1*; $\Delta \rho$ é o diferencial entre as densidades dos fluidos injetado (*Fluido 1*) e deslocado (*Fluido 2*), sendo $\Delta \rho = \rho_2 - \rho_1$ e g é a aceleração da gravidade.

Além desses parâmetros, a razão entre viscosidades η , definida anteriormente através da expressão (2-12), e o número de *Péclet* (Pe), que será definido no decorrer desta seção, compõem o total de parâmetros físicos que controlam o escoamento.

(Re) é o número de *Reynolds*, que descreve a relação entre forças inerciais e forças viscosas, e (F) é um parâmetro gravitacional, número de *Galilei*, que determina o efeito da flutuabilidade entre um par de fluidos com diferentes densidades. O parâmetro gravitacional, número de *Galilei*, será sempre nulo para a coordenada radial, uma vez que o trabalho se limita na análise de escoamentos verticais ascendentes.

Complementando o modelo matemático, considera-se a equação advec-tiva/difusiva adimensional (Equação (2-26)), que definirá um campo escalar de concentração não azimutal (Ou seja, $\partial/\partial\theta = 0$) em coordenadas cilíndricas como parte do modelo matemático, através do qual o campo de concentração é diretamente advectado por meio de um campo vetorial de velocidades. Através desta abordagem, um campo escalar irá definir a fração correspondente de um dos fluidos em cada célula, conforme exposto anteriormente, determinado por $0 \leq c \leq 1$, através do qual, inicialmente, cada fluido dispõe de uma concentração uniforme, porém distinta. Onde $c = 0$, define o fluido deslocador, *Fluido 1*, e $c = 1$ determina o fluido a ser deslocado, *Fluido 2*.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v_r \frac{\partial c}{\partial r} + v_z \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{1}{Pe} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] \quad (2-26)$$

A modelagem matemática do deslocamento entre os pares de fluidos miscíveis através do anular expandido foi desenvolvida assumindo que os fluidos são miscíveis e que a aproximação de *Boussinesq* (convecção natural) se aplica. Ou seja, as variações de densidade surgem apenas como força de empuxo na

equação do momento. A aproximação de *Boussinesq* também permite resolver a equação de transferência de massa como uma equação da advecção-difusão para uma determinada concentração de fluido, LANDAU & LIFSHITZ (1959) [32]. Desta forma, através da equação adimensional para a densidade, em (2-21), é possível admitir que a densidade varia com a concentração e é uma função da concentração: $\rho^* = \rho^*(c)$, onde, $\rho^* = 1 + c\Delta\rho/\rho_1$, onde $*$ denota a adimensionalidade da variável relacionada com a densidade dos fluidos. Com esta abordagem é possível o acoplamento da equação da advecção-difusão da concentração dos fluidos (2-26) nas equações de momento (2-19) e (2-20).

Conduta semelhante foi utilizada por ETRATI et al. (2020) [25], utilizando-se de um método de volumes finitos para discretização das equações de momento e a equação do campo de concentrações definido por um campo escalar c , onde c varia de acordo com: $0 \leq c \leq 1$, pelo qual identicamente, o campo de concentrações fica sujeito a um processo de advecção através de um campo vetorial de velocidades.

Desta forma é possível definir o último parâmetro adimensional, que define a razão entre os termos de advecção, determinada pelo campo de velocidades e a difusão, em um sistema hidrodinâmico caracterizado por fenômenos de transferência de massa: o número de *Péclet*, definido por Pe , conforme segue abaixo:

$$Pe = \frac{UR_{ext}}{D} \quad (2-27)$$

Onde D , é o coeficiente de difusão da substância transportada e, conforme já definido anteriormente, U é a velocidade média característica e R_{ext} é o comprimento característico.

2.2

Análise do Espectro dos Parâmetros Adimensionais Utilizados na Pesquisa em Relação à Aplicação Industrial

Durante qualquer operação de cimentação primária, uma variedade de fluidos são bombeados pelo interior da coluna de revestimento e subsequentemente através do anular entre revestimento e poço aberto.

Cada fluido utilizado tem características reológicas e funções próprias e específicas para cada tipo de aplicação. Um fluido espaçador é utilizado para promover a separação entre a pasta de cimento e o fluido de perfuração pré-existente e promover o deslocamento completo deste fluido de perfuração do anular compreendido entre o revestimento e poço aberto. Ele também tem a função de condicionar e limpar o interior do revestimento e anular.

Entender como as interfaces de mistura destes fluidos se inter-relacionam durante o processo de deslocamento é de fundamental importância para uma cimentação primária bem sucedida, uma vez que poderá afetar diretamente a eficiência da operação de cimentação e a integridade do poço. No momento em que o sistema de cimentação começa a se mover no interior do anular, este interage com o fluido espaçador anteriormente bombeado, interagindo também com o fluido de perfuração remanescente. Essas interações podem levar à formação de interfaces de mistura entre o sistema de fluidos da cimentação e os fluidos adjacentes.

O conhecimento destas interfaces de mistura é importante pois poderá afetar a capacidade do cimento de se ligar às paredes do poço e formar uma vedação eficaz. A má aderência do cimento do poço poderá causar um isolamento hidráulico inadequado e outros problemas estruturais e de integridade do poço, uma vez que, a existência de contaminações do cimento por fluido de perfuração pode afetar a resistência mecânica do cimento, tornando-o mais suscetível a falhas estruturais.

Para o monitoramento destas interfaces de mistura e a capacidade de deslocamento do sistema de cimentação é necessário o conhecimento e análise de diversos parâmetros que determinam suas características reológicas, densidades, difusividade e outras propriedades físico-químicas determinantes para uma operação com sucesso. De forma geral, as características dos fluidos utilizados em uma cimentação primária são determinados através de parâmetros adimensionais que definem e correlacionam diversos processos e fenômenos físico-químicos que ocorrem durante o processo de deslocamento como: forças viscosas, forças inerciais, tensões superficiais, forças gravitacionais, difusividade de partículas e de momento linear, advecção, capilaridade, fricção, etc.

No caso do presente trabalho, analisaremos a inter-relação entre estes fluidos e sua influência na interface de mistura e sua capacidade de deslocamento, através do monitoramento dos parâmetros adimensionais já anteriormente definidos: o número de *Péclet* (Pe), número de *Reynolds* (Re), número de *Galilei* ou fator gravitacional (F) e razão entre viscosidades (η).

Além do entendimento dos fenômenos relacionados com a interface de mistura entre fluidos e sua influência nos perfis de concentração, é de fundamental importância o planejamento de um desenho de taxa de bombeio eficiente e adequado para cada aplicação nas operações de cimentação primária de poços de petróleo, que podem variar, dependendo das características do poço e das condições específicas de cada operação. Neste caso, a utilização do número de *Reynolds* (Re) nas simulações é fundamental, pois o número de *Reynolds* está fortemente associado à mistura e distribuição dos fluidos e é importante

na determinação das taxas de bombeio que ofereçam a melhor eficiência de deslocamento sem prejudicar as propriedades estruturais e mecânicas durante a construção do poço.

Em geral, as taxas de bombeio devem ser escolhidas de forma a garantir que o cimento seja bombeado para o fundo no poço com uma velocidade suficiente para que ele se deposite de forma homogênea ao redor da coluna de revestimento. Para isso, é importante considerar a viscosidade do cimento, a pressão de bombeio, a geometria do poço e outros fatores que possam afetar a distribuição do cimento e a eficiência do deslocamento do fluido de perfuração.

Inicialmente, através do estudo da bibliografia científica que investiga o processo de cimentação primária de poços de petróleo, delimitamos as principais variáveis que determinam as propriedades dos fluidos utilizados neste tipo de operação:

Tabela 2.1: Variáveis e propriedades operacionais e de fluidos comumente utilizados na indústria. Coeficientes de difusividade de acordo com estudos de SAVERY et al (2007) [18].

Parâmetro Operacional	Min	Max
Vazão de Bombeio (bpm)	0.5	15
Densidade do Fluido Deslocador (kg/m^3)	1030	1577
Densidade do Fluido Deslocado (kg/m^3)	1437	2037
Viscosidade do Fluido Deslocador ($Pa \cdot s$)	0.010	0.100
Viscosidade do Fluido Deslocado ($Pa \cdot s$)	0.005	0.300
Coeficiente de Difusividade (m^2/s)	$1.94 \cdot 10^{-9}$	$1.94 \cdot 10^{-5}$

A partir das propriedades dos fluidos da tabela 2.1, foram calculados os respectivos parâmetros adimensionais, mínimos e máximos, correspondentes às variáveis da tabela:

Os parâmetros adimensionais da tabela 2.2 foram calculados a partir de determinadas geometrias de construção de poços, comumente utilizados na cimentação de revestimentos de produção.

Para o cálculo dos parâmetros adimensionais da tabela 2.2 foram utilizados as seguintes arquiteturas de construção de poço com as seguintes dimensões nominais de poço aberto e revestimento: $12\frac{1}{4} \times 9\frac{7}{8}$, $8\frac{1}{2} \times 6\frac{5}{8}$ e $7\frac{5}{8} \times 6\frac{1}{4}$.

Devido à magnitude do espectro de aplicações dos parâmetros adimensionais, durante nosso estudo, limitamos a utilização de uma única geometria de construção de poço e uma faixa menor, porém representativa, de parâmetros

Tabela 2.2: Faixa de parâmetros adimensionais calculados a partir da tabela 2.1. Estes intervalos representam os valores dos parâmetros adimensionais que podem aparecer em campo.

Parâmetro Adimensional	Min	Max
Número de <i>Reynolds</i> (Re)	250	4709
Fator Gravitacional (F)	$-1.7 \cdot 10^6$	$5.7 \cdot 10^6$
Número de <i>Péclet</i> (Pe)	640	$190 \cdot 10^6$
Razão entre Viscosidades(η)	-0.69	3.40

adimensionais de forma a tornar possível o estudo aprofundado da influência de cada parâmetro.

A estratégia e metodologia de aplicação dos parâmetros adimensionais nas simulações numéricas serão mais detalhadamente abordadas nas seções posteriores.

2.3

Estudo de Malha

Um estudo de convergência numérica foi realizado com o objetivo de se avaliar um passo de tempo computacional Δt , para as interações do simulador numérico e uma determinada densidade de malha que se mostrassem compatíveis e adequados com as investigações e objetivos do trabalho proposto.

Como resultado esperado, a convergência numérica destas análises é um excelente indicativo como comprovação da acuracidade e rigor dos resultados numéricos do modelo proposto em relação à solução analítica das equações consideradas.

Em uma primeira abordagem foi utilizada uma geometria sem expansão da seção transversal, levando-se em conta a curvatura dos tubos concêntricos em decorrência do tratamento matemático empregando coordenadas cilíndricas. Para esta análise, foram utilizados e mantidos constantes os parâmetros adimensionais: número de *Reynolds*, número de *Péclet*, número de *Galilei* e razão entre viscosidades constantes respectivamente com os valores: $Re = 1$, $Pe = 1000$, $F = 0$ e $\eta = 2$.

Foram também mantidos constantes as configurações geométricas adimensionais resultantes da razão entre raios interno e externo, e comprimento característico, que definirão o domínio, utilizando os valores respectivamente de $R_{int}/R_{ext} = 0.50$ e $L/R_{ext} = 10$, conforme figura 2.4, que apresenta os perfis de concentração adimensional entre dois fluidos newtonianos e miscíveis

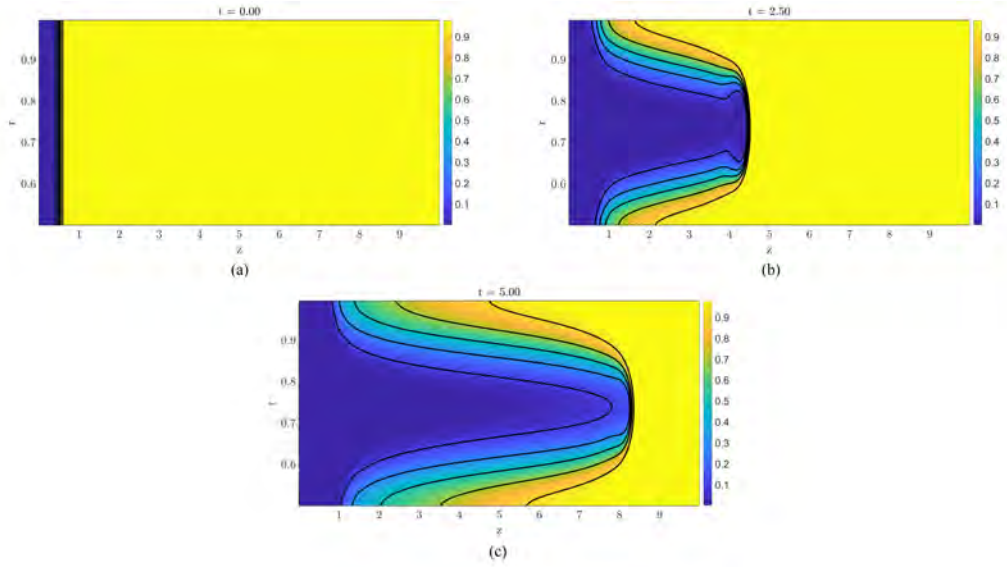


Figura 2.4: Simulação dos perfis da concentração entre dois fluidos newtonianos miscíveis para diferentes intervalos de tempo adimensional, através de um anular estreito, com os parâmetros adimensionais: $Re = 1$, $Pe = 1000$, $F = 0$ e $\eta = 2$: (a) $t = 0$; (b) $t = 25$; (c) $t = 50$;

sendo deslocados através de um anular estreito, cuja concentração varia entre $0 < c < 1$, conforme demonstram as barras de cor na lateral de cada um dos gráficos, com as isolinhas de contorno da concentração com valores respectivos de: $c = 0.1$, $c = 0.3$, $c = 0.5$, $c = 0.7$ e $c = 0.9$.

Os gráficos contemplam os intervalos de tempo adimensional para: $t = 0$, $t = 25$ e $t = 50$, segundo respectivamente os gráficos: 2.4a), 2.4b) e 2.4c).

Os valores de tempos adimensionais foram selecionados com o propósito único de ilustrar de imediato o comportamento hidrodinâmico do escoamento em questão, e para que o leitor visualize preliminarmente o problema de forma gráfica do deslocamento entre os dois fluidos em uma seção transversal axissimétrica transversal sem a expansão abrupta.

Para a caracterização do estudo de passo de tempo, será analisado o comportamento da velocidade axial da frente de propagação da concentração $v_{z(tip)}$, posicionada no ponto mais extremo do contorno correspondente à isolinha de concentração $c = 0.5$, conforme figura 2.5, mantendo-se constantes os parâmetros adimensionais: $Re = 1$, $Pe = 1000$, $F = 0$ e $\eta = 2$, para cada um dos passos de tempo analisados, com valores de: $\Delta t = 0.5 \times 10^{-4}$, $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}$, $\Delta t = 2.0 \times 10^{-4}$, $\Delta t = 4.0 \times 10^{-4}$ e $\Delta t = 8.0 \times 10^{-4}$.

Como resultado do estudo de passo de tempo e através de uma abordagem qualitativa preliminar. A partir do gráfico da figura 2.6, torna-se evidente que as curvas das velocidades axiais $v_{z(tip)}$ em função do intervalo de tempo

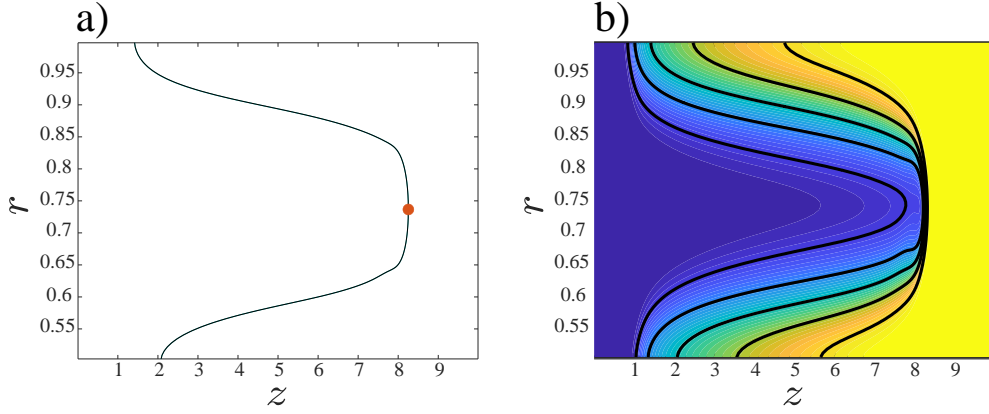


Figura 2.5: Simulação demonstrando: a) velocidade correspondente à $v_{z(tip)}$, que representa a velocidade axial do ponto localizado mais ao extremo da isolinha de concentração adimensional associada a $c = 0.5$ e b) perfil de concentração correspondente. $Re = 1$, $Pe = 1000$, $F = 0$ e $\eta = 2$.

adimensional selecionado, $0 > t > 1.9$, para cada passo de tempo de interação Δt , arbitrariamente utilizados, respectivamente com valores de : $\Delta t = 0.5 \times 10^{-4}$, $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}$, $\Delta t = 2.0 \times 10^{-4}$, $\Delta t = 4.0 \times 10^{-4}$ e $\Delta t = 8.0 \times 10^{-4}$, apresentam comportamentos com uma tendência visível à estabilização em uma velocidade axial constante, $v_{z(tip)} = 1.6$, a partir do tempo $t = 0.6$.

Conforme observado, a preservação desta predisposição à estabilidade e constância da velocidade axial $v_{z(tip)}$ para diferentes intervalos de tempo Δt , evidencia uma tendência à valores também quase constantes para os erros de intervalo de tempo, permitindo a determinação segura de seu erro percentual, calculado através da relação entre as velocidades axiais $v_{z(tip)}$, para cada passo de tempo correspondente, em relação à velocidade axial $v_{z(tip)}$ associada a um passo de tempo referencial, suficientemente pequeno e que garanta a precisão das simulações, cujo valor utilizado foi: $\Delta t = 0.125 \times 10^{-4}$.

Estabelecidas as condições acima, é possível a elaboração de um gráfico que demonstra cada um dos erros percentuais em função do tempo adimensional t , a partir das velocidades axiais $v_{z(tip)}$ da frente de propagação da concentração em $c = 0.5$, para cada um dos passos de tempo Δt , com valores: $\Delta t = 0.5 \times 10^{-4}$, $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}$, $\Delta t = 2.0 \times 10^{-4}$, $\Delta t = 4.0 \times 10^{-4}$ e $\Delta t = 8.0 \times 10^{-4}$, em comparação à velocidade axial $v_{z(tip)}$, em relação ao passo de tempo pré-determinado, $\Delta t = 0.125 \times 10^{-4}$, demonstrado na figura 2.7.

A importância do estudo de passo de tempo do modelo numérico assegura que os parâmetros utilizados, números de *Reynolds* (Re), número de *Péclet* (Pe), razão entre viscosidades (η) e número de *Galilei* (F), poderão ser utilizados em amplo espectro.

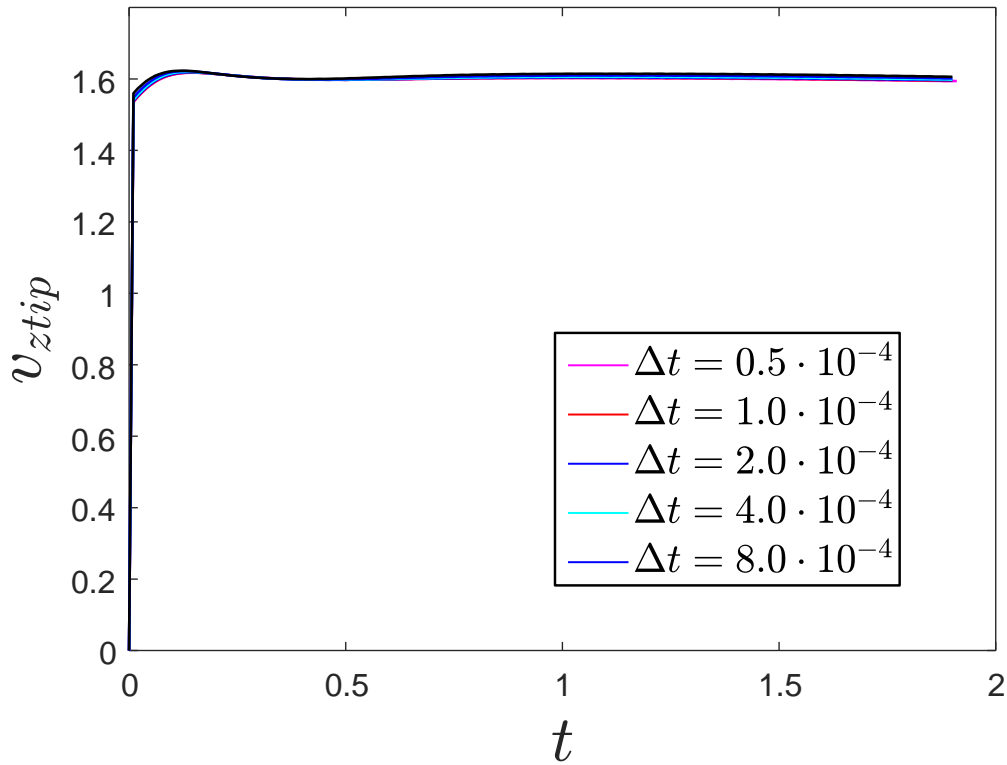


Figura 2.6: Curvas da velocidade axial de propagação para concentração $c = 0.5$ em função do tempo $0 < t < 1.9$, para diversos intervalos de passo de tempo Δt , arbitrariamente selecionados.

De acordo com a observação do gráfico 2.7 é possível inferir que, o valor referente ao passo de tempo computacional que oferece flexibilidade suficiente para utilização destes parâmetros adimensionais, sem o comprometimento da eficiência computacional em relação aos tempos de simulação, é $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}$, cujo valor será utilizado em nossas simulações durante todo o estudo.

Um segundo parâmetro de investigação da malha computacional a ser perseguido refere-se à averiguação da densidade de malha. Originalmente o código utiliza uma malha retangular uniforme contendo uma resolução de 800×80 . Contudo, é válido a análise da resolução de malha para valores mais ou menos refinados. Neste sentido foram utilizados dois parâmetros hidrodinâmicos essenciais com o objetivo da determinação da resolução de malha mais adequada ao estudo: a concentração dos fluidos c e a velocidade axial do deslocamento v_z . A seguinte estratégia foi abordada para a condução deste estudo:

- (i) Análise das malhas numéricas com resolução de 100×10 , 400×40 , 800×80

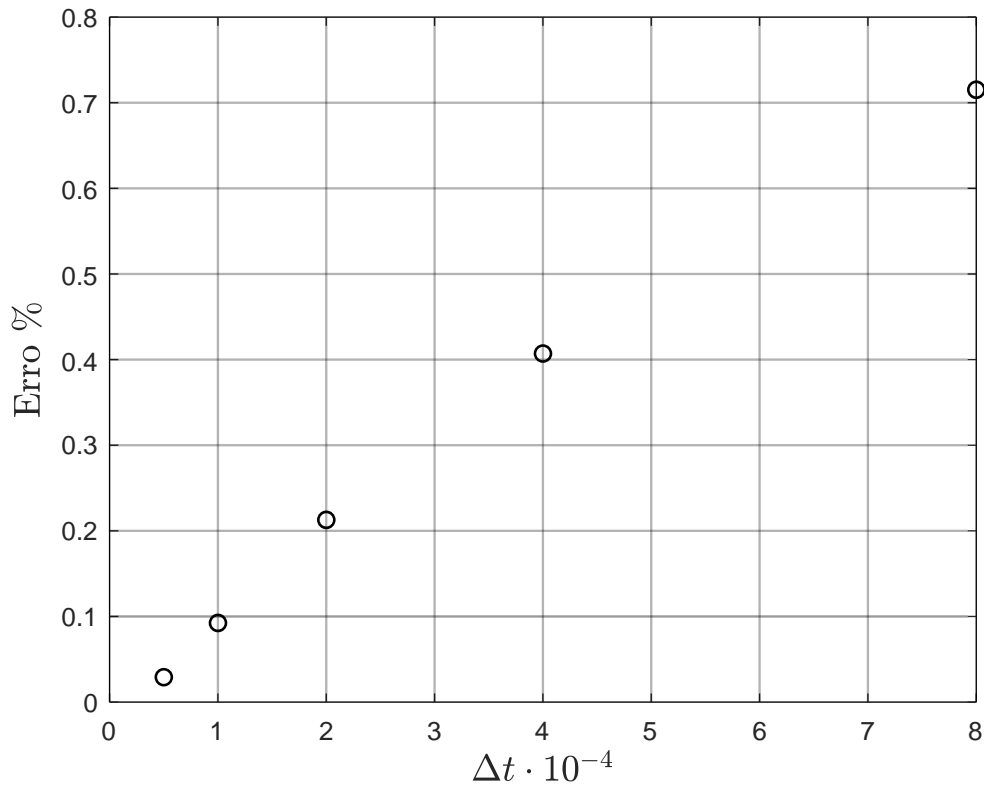


Figura 2.7: Determinação das curvas de erro percentual do passo de tempo numérico, tendo como referência a velocidade axial da propagação da isolinha de concentração em $c = 0.5$ em função do tempo.

e 1500x150;

- (ii) Determinação dos perfis de velocidade axial em $z = 4$ e instante $t = 3.6$ para análise qualitativa das diferentes resoluções de malhas numéricas;
- (iii) Determinação dos perfis de concentração para análise qualitativa das diferentes resoluções de malhas numéricas no instante $t = 3.6$;
- (iv) Cálculo de erro numérico de uma determinada região (A região expandida foi arbitrariamente selecionada) do campo de velocidades axiais em relação ao mesmo campo de densidade de malha mais refinada, no instante $t = 3.6$ (Neste caso 1500x150).
- (v) Cálculo do erro numérico de uma determinada região (a região expandida foi arbitrariamente selecionada) do campo de concentrações em relação ao mesmo campo de densidade de malha mais refinada, no instante $t = 3.6$ (Neste caso 1500x150).

Em nosso estudo de malha utilizamos 5 tipos de resolução de malhas numéricas $N_x \times N_y$, onde N_x define o número de células para a coordenada axial z e N_y estabelece o número de células para a coordenada radial r : 100x10, 400x40, 800x80, e 1500x150. Conforme figura 2.8, que demonstra o resultado de uma simulação utilizando os seguintes parâmetros adimensionais: $Re = 1$, $Pe = 1000$, $\eta = 2$ e $F = 0$, cujo valores foram mantidos fixos desde a análise anterior do passo de tempo computacional.

Para os estudos de densidade de malha foi utilizado uma configuração geométrica axissimétrica em coordenadas cilíndricas com dois dutos concêntricos, com domínio do comprimento adimensional representado pelo intervalo $0 < z < 10$, com um raio externo adimensional $r = 1$, representando o poço aberto, um raio interno adimensional $r = 0.5$, caracterizando o revestimento, uma expansão abrupta com geometria quadrada, com expansão adimensional axissimétrica, representada pelo intervalo $1 < r < 1.2$ e início e final da expansão no eixo axial nos intervalos $3.5 < z < 6.5$, conforme figura 2.8.

Com o objetivo de reproduzir o instante em que o escoamento atinge a região expandida e as frentes de propagação da concentração podem ser perfeitamente visualizadas, empregamos um instante especialmente selecionado em $t = 3.6$, através do qual, é possível observar o deslocamento do *Fluido 1* em azul, deslocando um *Fluido 2* em amarelo. Figura 2.8.

Através de uma análise qualitativa preliminar é possível observar que a malha com densidade 100x10 da 2.8a) não apresenta uma resolução apropriada em comparação com as demais malhas utilizadas para este estudo. Contudo, a mesma análise qualitativa entre as demais resoluções torna-se impraticável, devido às diferenças visuais imperceptíveis entre as outras malhas em relação à malha mais densa da figura 2.8e), equivalente à uma densidade de malha de 1500x150.

De maneira análoga e mantendo-se constantes todos os parâmetros adimensionais e configurações geométricas, foram elaborados os respectivos gráficos dos perfis de velocidade axial v_z para cada uma das resoluções de malha, conforme: 2.9. Para este cenário, os perfis de velocidade para cada uma das malhas foram capturados a partir da coordenada $z = 4$, conforme geometria da figura 2.8.

Através da figura 2.9, uma vez mais, é possível a realização de uma análise qualitativa, através do qual é possível concluir que o perfil das velocidades axiais referentes às densidades de malha equivalentes à 100×10 e 400×40 , se distanciam dos perfis das demais resoluções de malha utilizadas nas simulações, respectivamente: a malha originalmente utilizada, 800×80 e a mais refinada, 1500×150 .

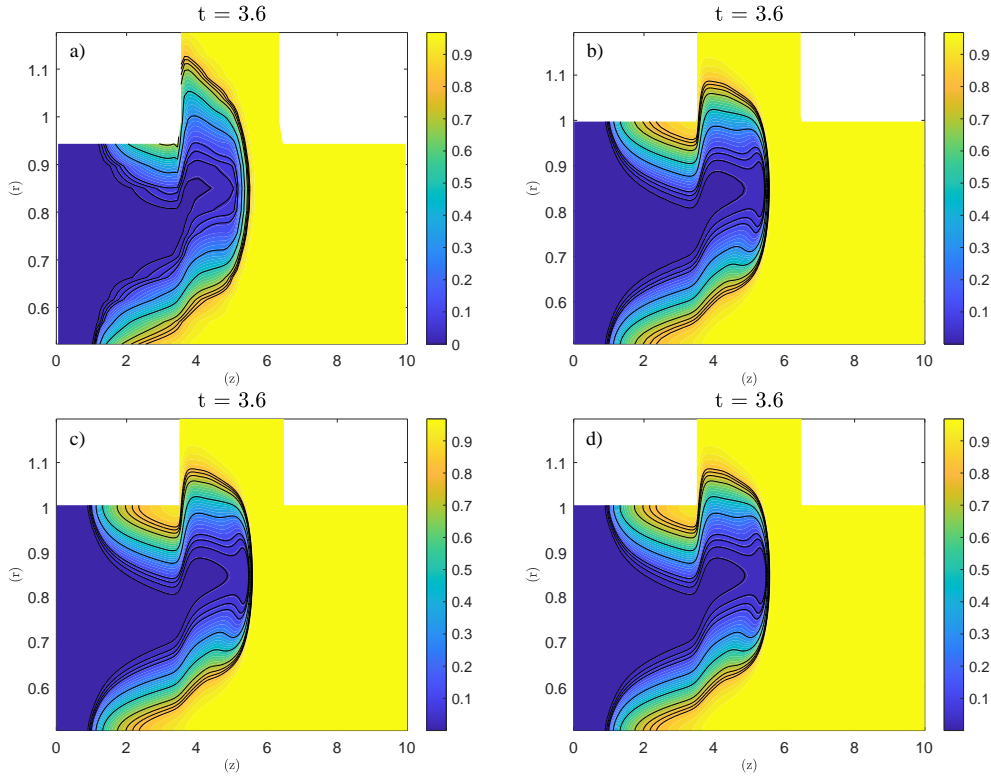


Figura 2.8: Perfis simulados da frente de concentração para diferentes densidades de malha numérica em $t = 3.6$ a) *Mesh* 100x10, b) *Mesh* 400x40, c) *Mesh* 800x80 e d) *Mesh* 1500x150. Os parâmetros adimensionais utilizados foram: $Re = 1$, $Pe = 1000$, $\eta = 2$ e $F = 0$.

Como desfecho das simulações e análises de resolução das malhas analisadas, obteve-se os seguintes resultados que representam os respectivos erros da média das concentrações e das velocidades axiais na região representada pelo domínio em z de: $3.5 < z < 6.5$. Figura 2.11.

Como resultado, observamos que, a malha 800 x 80 apresenta o menor erro percentual em relação à malha mais densa utilizada como referência, 1500 x 150. A malha retangular uniforme 800 x 80 será utilizada ao longo de todo o trabalho e em todas as simulações, conforme figura 2.10.

Estudos de malha numérica são essenciais para a determinação da estruturação mais adequada para as simulações numéricas geradas através de métodos CFD. NACCACHE et al. (2018) [6] realizaram testes em 4 diferentes malhas. As malhas foram testadas com um fluido newtoniano através de um regime de escoamento laminar e utilizou-se do fator de fricção para determinação do erro percentual.

Para checar a convergência dos resultados numéricos, ETRATI et al. (2020) [25] simularam diversos deslocamentos de fluxo através de um canal

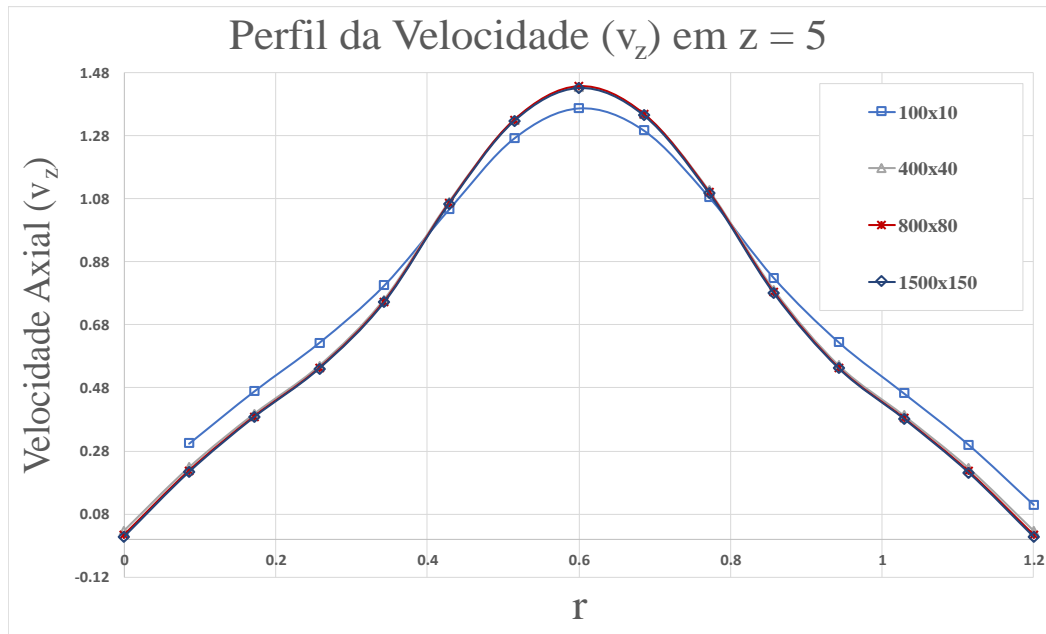


Figura 2.9: Perfis da velocidade axial v_z para as diversas resoluções de malha 100×10 , 400×40 , 800×80 e 1500×150 . Os parâmetros adimensionais utilizados foram: $Re = 1$, $Pe = 1000$, $\eta = 2$ e $F = 0$.

bidimensional utilizando diferentes tamanhos de malha (30×600 , 60×600 e 90×900) e parâmetros de regularização : Taxa de deformação em y , velocidade do perfil em y e a evolução da velocidade no tempo. Obtendo resultados bem semelhantes para todas resoluções de malha.

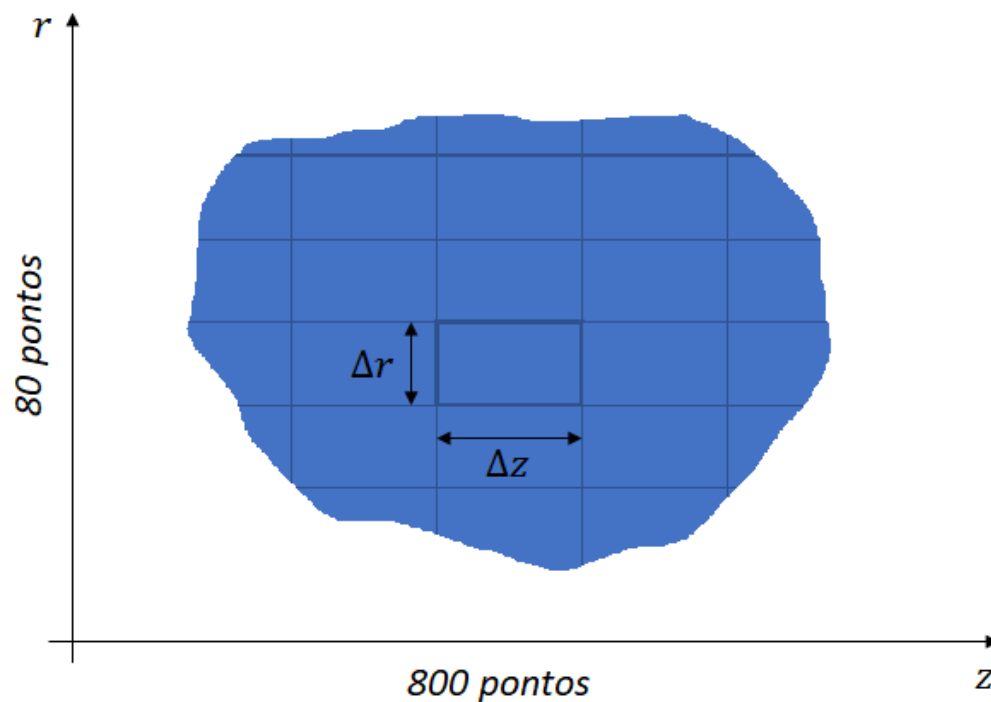


Figura 2.10: Figura ilustrando a malha original selecionada nas simulações e análises.

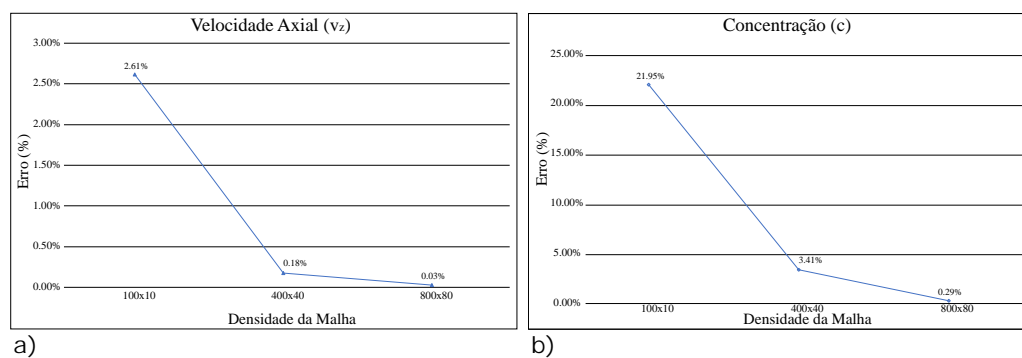


Figura 2.11: Curvas de erros percentuais na região expandida para $3.5 \leq z \leq 6.5$ em função da densidade de malha. a) Erro percentual das curvas de velocidade axial e b) Erro percentual dos perfis de concentração.

3

Resultados, Análises e Discussões

As análises do comportamento hidrodinâmico de cada cenário foram realizadas através de um simulador numérico DNS, previamente desenvolvido, que resolve as equações de *Navier-Stokes* através de um modelo matemático axissimétrico bidimensional, que descreve o deslocamento miscível de um fluido newtoniano por um segundo fluido, também newtoniano, através do anular entre dois dutos concêntricos, onde o mais externo, apresenta uma expansão abrupta. Este tipo de escoamento através de um anular com mudança da seção transversal é frequentemente observado nas operações de cimentação primária. Relativo à fenômenos hidrodinâmicos, espera-se que diversos efeitos possam ocorrer à medida que o fluido entre e se expanda através do *washout* e posteriormente se contraia após o estreitamento do trecho anular.

A grande diversificação de variáveis envolvidas no processo de escoamento de um par de fluidos através de um *washout* pode ser extremamente ampla e a quantidade de resultados possíveis através da combinação destas diversas variáveis torna o problema do deslocamento entre dois fluidos miscíveis extremamente complexo. Portanto, é imprescindível a aplicação de algumas premissas e critérios, de modo a simplificar o problema sem comprometer os resultados e de forma a manter a proximidade com resultados de outros estudos e modelos práticos.

Desta forma, a estratégia utilizada para as simulações e obtenção dos resultados seguirá um modelo geral de aplicação dos parâmetros adimensionais, conforme apresentado na tabela 3.1 abaixo:

Tabela 3.1: Estratégia metodológica geral para determinação dos resultados e simulações numéricas.

	Geometria	Re	Pe	η	F
Análise Geometria	(A)	1	1000	2	0
Análise Re	Fixa	(B)	1000	2	0
Análise Pe	Fixa	1	(C)	2	0
Análise η	Fixa	1	1000	(D)	0
Análise F	Fixa	1	1000	2	(E)

A variação da análise de cada um dos parâmetros é constituída da seguinte forma, conforme os itens abaixo correspondentes à tabela 3.1:

- (A) **Geometria**: Variando-se o raio interno, comprimento do washout e largura do *washout*;
- (B) **Re**: 1, 250, 1250 e 2000;
- (C) **Pe**: 1000, 6000, 10000 e 50000;
- (D) η : -2, -1, 0, 1 e 2;
- (E) **F**: -3000, 0 e 3000;

A tabela 3.1 acima estabelece a estratégia metodológica utilizada para as simulações numéricas. A análise geométrica é realizada através da variação de alguns parâmetros geométricos, que serão discutidos nas próximas seções, e fixando-se os parâmetros hidrodinâmicos. Da mesma forma, a análise dos demais parâmetros adimensionais utilizados: *Reynolds* (Re), *Péclet* (Pe), razão entre viscosidades (η) e o número de *Galilei* (F), obedecem o mesmo princípio, através da variação de cada um dos parâmetros, mantendo-se fixo uma determinada geometria. Por exemplo, para a análise hidrodinâmica do escoamento para diversos valores de número de *Reynolds* (Re), a geometria é mantida fixa, bem como são fixados o número de *Péclet* em ($Pe = 1000$), razão entre viscosidades ($\eta = 2$) e o número de *Galilei* ($F = 0$), considerando-se fluidos isodensos.

Cada um dos parâmetros acima será discutido com mais profundidade nas próximas seções.

3.1

Metodologia para o Cálculo da Eficiência de Deslocamento

Conforme discutido anteriormente para a determinação da relação entre viscosidade variável e o campo de concentração, através da expressão (2-11), o campo de concentração rastreia cada um dos fluidos e identifica a interface difusa entre eles. Desta forma, valores médios de concentração podem ser usados para o cálculo preciso da eficiência do deslocamento. Como exemplo, na condição inicial, a geometria está praticamente preenchida com o fluido deslocado *Fluido 2*, sendo a concentração média global inicial próxima de $\bar{c} = 1$. À medida que o deslocamento é efetuado, o fluido injetado *Fluido 1*, passa a preencher o domínio, e como resultado, a concentração média vai sendo reduzida gradativamente. No momento em que, somente o fluido injetado *Fluido 1* estiver presente no anular, encontraremos um valor de concentração média global próximo de zero $\bar{c} = 0$. Desta forma, a eficiência do deslocamento poderá ser definida por um $\epsilon = 1 - \bar{c}$.

É importante destacar que, devido à natureza difusa da interface e a presença do campo de concentração que captura o transporte de massa na interface, esta definição de eficiência torna-se extremamente interessante em relação à abordagem típica através de relação entre área/volume ocupado pelo fluido injetado e área/volume total do domínio analisado. [7] [29] [14] [16].

A eficiência do deslocamento \bar{c} através da média global é calculada por meio das médias ponderadas ao longo dos eixos z e r , de acordo com a seguinte sequência de expressões:

$$\bar{c} = \frac{\sum_{i=1}^{N_z} c_i}{N_r}$$

Onde, \bar{c} é a média das concentrações ao longo do eixo radial, que é calculada para cada instante de tempo de simulação e N_r é a quantidade de pontos da malha do eixo radial r e N_z é a quantidade de pontos da malha no eixo axial z .

$$\bar{\bar{c}} = \frac{\sum_{j=1}^{N_r} \bar{c}_j}{N_z}$$

Pelo qual, $\bar{\bar{c}}$ calcula a média de \bar{c} ao longo do eixo axial, para cada instante de tempo de simulação. Ou seja, para cada instante de tempo de simulação haverá um ponto que determinará a média ponderada global.

$$\epsilon = 1 - \bar{\bar{c}}$$

ϵ é a eficiência do deslocamento calculada a partir dos dois eixos, r e z , para cada instante de tempo, tal que: $0 \leq \epsilon \leq 1$. No presente trabalho, $N_z = 4000$ e $N_r = 160$ e o tempo varia segundo $0 \leq t \leq 90$. Esta metodologia para o cálculo da eficiência será utilizada para todas as análises, para cada um dos parâmetros de controle abordados no trabalho.

3.2

Comportamento Hidrodinâmico Segundo Diferentes Configurações Geométricas

Nesta seção demonstraremos como diferentes configurações geométricas da expansão abrupta pode influenciar o comportamento hidrodinâmico do escoamento. Para fins comparativos, nesta análise foram mantidos fixos todos os parâmetros hidrodinâmicos, viscosidades e densidades que governam o escoamento:

- Número de *Reynolds* ($Re = 1$);
- Número de *Péclet* ($Pe = 1000$);

- Número de *Galilei* ($F = 0$);
- Razão entre Viscosidades ($\eta = 2$);

Para esta investigação o leitor deverá recapitular a figura 2.2, pelo qual o modelo geométrico simplificado da expansão no poço é demonstrado. A variação dos parâmetros geométricos adimensionais correspondentes ao raio interno (R_{int}), comprimento axial da expansão (L) e comprimento radial da expansão (H) ocorrerá sempre em relação ao raio externo do poço aberto, de tal forma que o parâmetro geométrico adimensional referente ao raio externo (R_{ext}) resultará em 1. Desta forma, os parâmetros geométricos adimensionais investigados são apresentados conforme abaixo, representados pela tabela 3.2 e figura 3.1.

Tabela 3.2: Dimensões investigadas para análise do comportamento hidrodinâmico com a variação dos parâmetros geométricos adimensionais.

Comprimento Adimensional				
R_{ext}	1	1	1	1
R_{int}	0.5	0.6	0.7	0.8
L	3	23	43	-
H	0.2	0.4	0.6	-

Domínio em z : $0 < z < 50$

Desse modo é possível converter os valores das variáveis geométricas adimensionais para seus respectivos valores reais, tomando-se como premissa a utilização de um poço aberto com diâmetro de $8\frac{1}{2}pol$, referente ao raio externo considerado, conforme tabela 3.3 e figura 3.2.

Tabela 3.3: Dimensões geométricas correspondentes às medidas adimensionalizadas considerando um poço aberto com diâmetro externo de $8\frac{1}{2}$.

Dimensões Geométricas do Poço				
$R_{ext}(pol)$	4.250	4.250	4.250	4.250
$R_{int}(pol)$	2.125	2.550	2.975	3.313
$R_{ext} - R_{int}(pol)$	2.125	1.700	1.275	0.938
$H(cm)$	2.159	4.318	6.477	-
$R_{ext} + H(pol)$	5.100	5.950	6.800	-
$L_w(cm)$	32.39	248.29	464.19	-
$L_l(cm)$	37.78	37.78	37.78	-
$L_r(cm)$	469.58	253.68	37.78	-
$L_t(cm)$	212.50	212.50	212.50	-

Apesar da versatilidade na utilização das variáveis geométricas adimensionais, visando aproximar o estudo à realidade operacional, optou-se pela

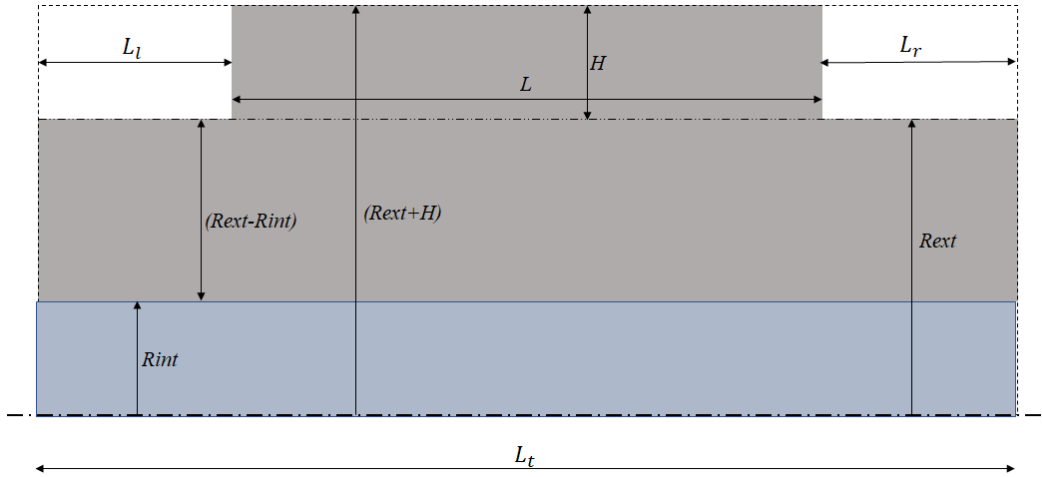


Figura 3.2: Configurações geométricas do poço de petróleo em referência às dimensões da Tabela 3.3

3.2.1

A Influência do Espaço Anular entre Revestimento e Poço Aberto no Comportamento Hidrodinâmico do Deslocamento

A alteração das dimensões do espaço anular, compreendidos pelo raio externo do revestimento e raio interno do poço aberto, definidos aqui respectivamente como R_{int} e R_{ext} , poderá afetar o perfil de concentração de um deslocamento entre dois fluidos miscíveis que fluem através deste espaço anular.

Caso a abertura anular seja reduzida, por exemplo, mantendo-se o raio do poço aberto (R_{ext}) constante e aumentando-se as dimensões do raio do revestimento (R_{int}), menor será o tempo necessário para que ocorra a difusão ou mistura no sentido axial do escoamento. Esta condição pode ser percebida qualitativamente através da figura 3.3, que descreve o processo de deslocamento miscível de um fluido inicialmente com concentração $c = 1.0$, representado pela cor amarela, sendo deslocado por um fluido com concentração $c = 0.0$, representado pela cor azul. As isolinhas de propagação da concentração em aproximadamente $c = 0.0$ e $c = 1.0$, são expressadas através de linhas respectivamente à jusante do fluido deslocador (*Fluido 1*), e à montante do fluido deslocado (*Fluido 2*).

Na figura 3.3, as colunas da esquerda para direita, representam o deslocamento nos instantes adimensionais $t = 15$, $t = 45$ e $t = 75$, respectivamente, e as linhas, de cima para baixo, os revestimentos com as dimensões adimensionais em relação ao poço aberto, $R_{int} = 0.5$, $R_{int} = 0.6$, $R_{int} = 0.7$ e $R_{int} = 0.8$, respectivamente, ou seja, a abertura anular é reduzida, observando-se as ilustrações de cima para baixo, mantendo-se constante o diâmetro adimensional

do poço aberto em $R_{ext} = 1$ e o comprimento adimensional do *washout* no sentido radial (r), $H = 0.2$, comprimento adimensional do *washout* no sentido axial (z), $L = 23$, com domínio axial do deslocamento de 0 a 50.

Através da figura 3.3, em um primeiro momento é possível observar que a distância entre as isolinhas de concentração, para $c = 0.0$ e $c = 1.0$, é reduzida à medida que a abertura do espaço anular é diminuída.

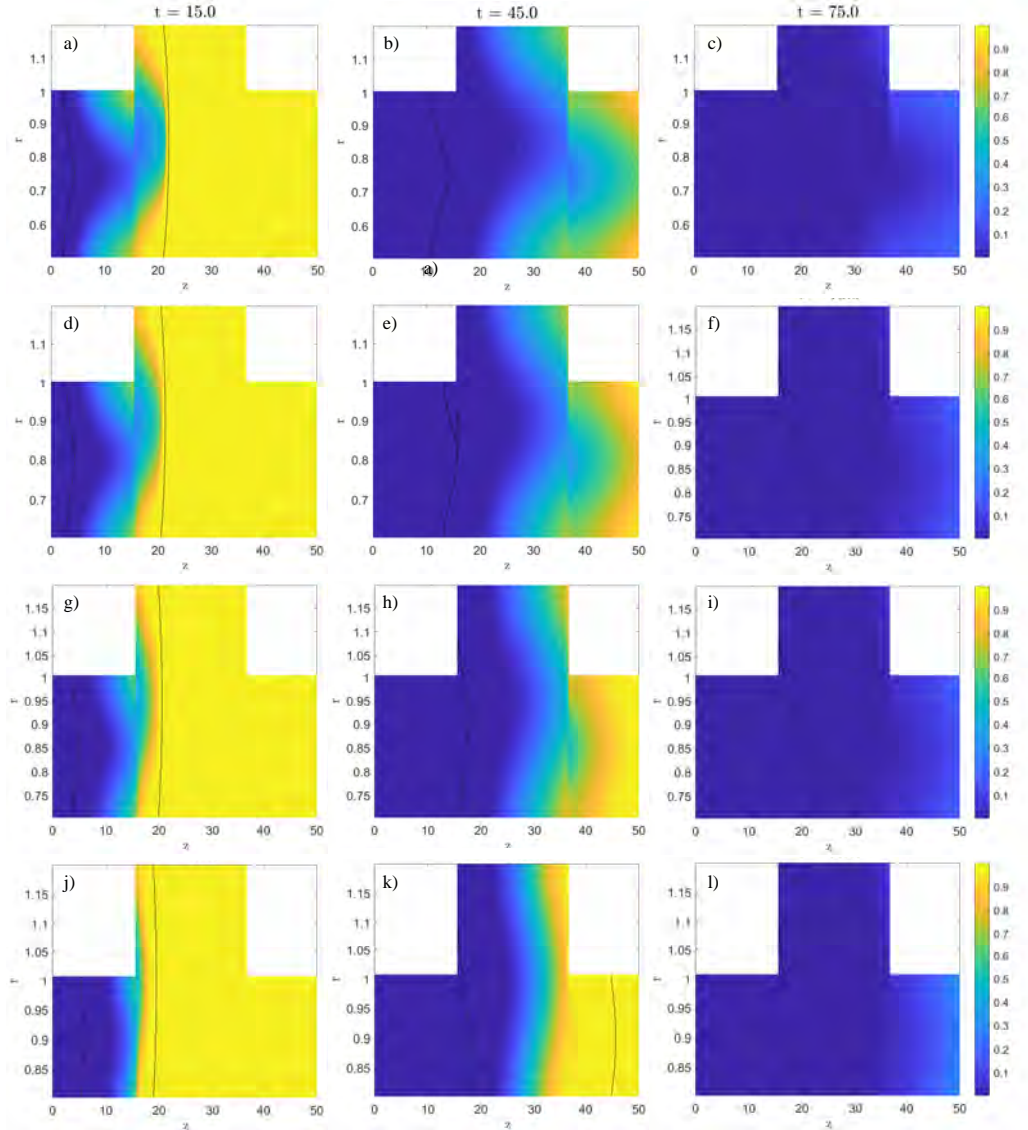


Figura 3.3: Simulações demonstrando as frentes de propagação do escoamento entre dois fluidos isodensos para diferentes diâmetros de revestimento, de cima para baixo: $R_{int} = 0.5$, $R_{int} = 0.6$, $R_{int} = 0.7$ e $R_{int} = 0.8$. E da esquerda para direita, nos instantes: $t = 15$, $t = 45$ e $t = 75$, com parâmetros hidrodinâmicos: $Re = 1$, $Pe = 1000$, $F = 0$ e razão entre viscosidades $\eta = 2$.

Com esta primeira análise, através da figura 3.3, é interessante observar que, o deslocamento da isolinha de concentração referente à $c = 0.0$, progride

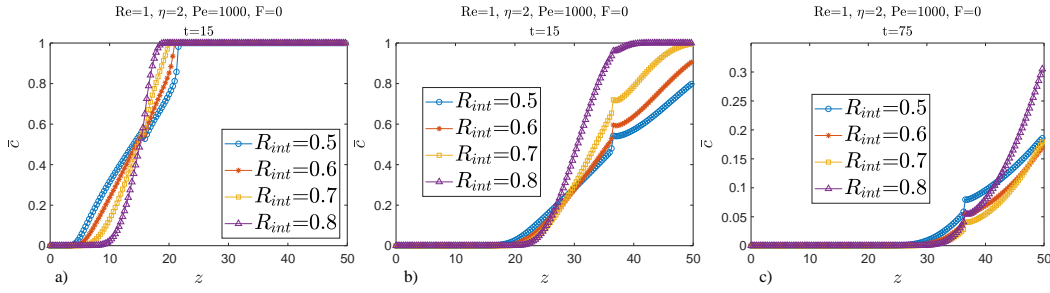


Figura 3.4: Gráficos da concentração média \bar{c} ao longo do raio em função de z para os instantes de tempo $t = 15$, $t = 45$ e $t = 75$, da esquerda para direita, considerando os diferentes diâmetros de revestimento R_{int} .

mais rapidamente através da expansão nas aberturas anulares maiores, em comparação às outras aberturas de menores dimensões, fato claramente retratado através da observação do avanço da isolinha de concentração $c = 0$ no interior da expansão para o instante $t = 75$, denotando-se uma melhor performance de deslocamento para anulares maiores.

A redução da difusão das moléculas, bem como o comprimento da mistura, entre os fluidos deslocador (*Fluido 1*) e deslocado (*Fluido 2*), é mais claramente retratada através do gráfico da figura 3.4, para os mesmos instantes representados anteriormente, respectivamente $t = 15$, $t = 45$ e $t = 75$.

A figura 3.4 expressa a concentração média \bar{c} , ao longo do eixo z para os instantes de tempo $t = 15$, $t = 45$ e $t = 75$ para diferentes raios internos R_{int} . A avaliação destes gráficos confirma que a difusão entre os fluidos ocorre mais rapidamente em espaços anulares mais amplos, onde o comprimento de mistura diminui juntamente com a ampliação do espaço anular.

A relação entre a concentração e a velocidade de um par de fluidos newtonianos miscíveis durante o fluxo no interior de um espaço anular é regida fisicamente através do acoplamento entre as equações advectivo/difusiva, continuidade e do momento: a taxa de fluxo de massa de um par de fluidos deve permanecer constante em todos os pontos ao longo do deslocamento, significando que, se a concentração (massa por unidade de volume) aumenta em algum ponto ao longo do deslocamento, a velocidade do fluido deverá diminuir para manter a mesma vazão mássica.

Por outro lado, se a concentração do fluido diminui, a velocidade do fluido deve aumentar para manter a mesma taxa de fluxo de massa, pressupondo-se que o deslocamento ocorre sob um estado quase estacionário, sem alterações na taxa de fluxo ou outras propriedades do fluido. Uma vez que, caso a taxa de fluxo ou outras propriedades inerentes aos fluidos se alterem, a relação entre concentração e velocidade poderá ser bem mais complexa.

No caso do presente trabalho, por se tratar de dois fluidos newtonianos escoando com uma taxa de fluxo constante, esta relação entre concentração e velocidade, descrita no parágrafo anterior, pode ser confirmada através da figura 3.5, demonstrando que as velocidades axiais em função do eixo r para diferentes instantes de tempo e em duas posições diferentes ao longo do eixo z . Na primeira coluna dos gráficos, as velocidades axiais analisadas são tomadas ao centro da primeira seção sem expansão, em $z = 12.5$ e a segunda coluna correspondem às velocidades axiais a partir do centro da expansão, em $z = 25$.

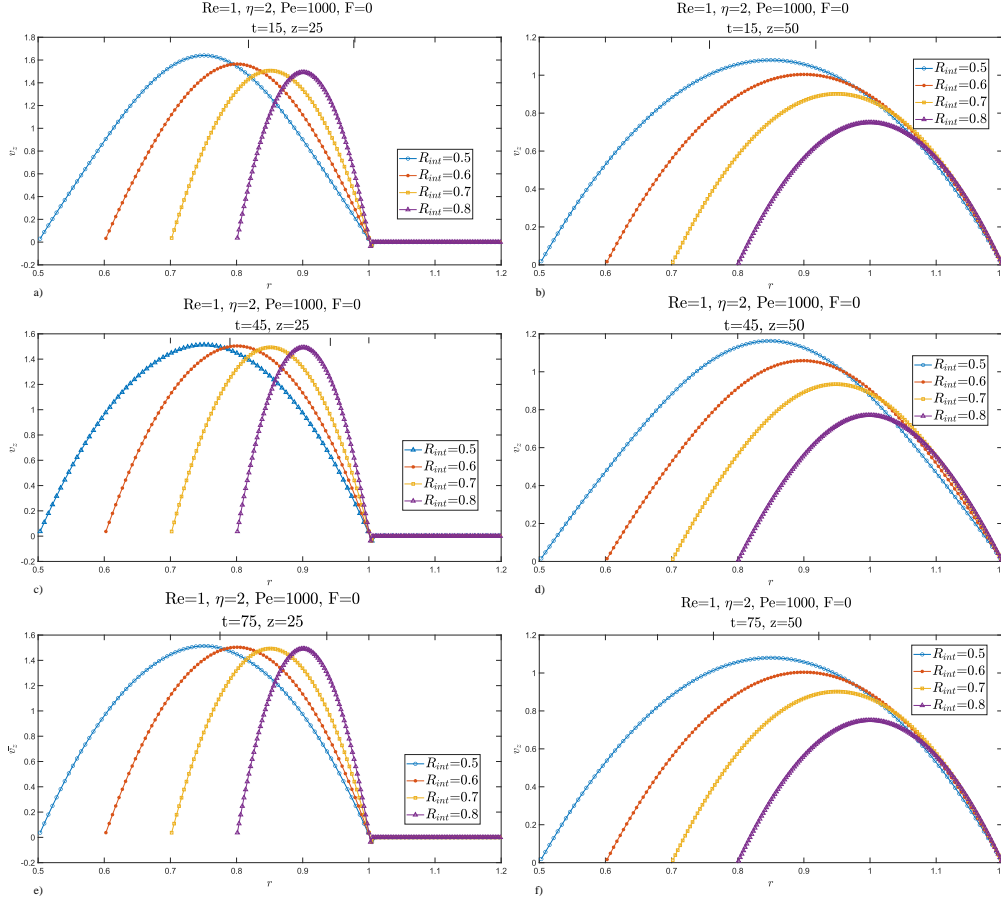


Figura 3.5: Gráficos simulando a velocidade v_z em função do eixo das ordenadas r para os instantes de tempo $t = 15$, $t = 45$ e $t = 75$, da esquerda para direita, considerando os diferentes diâmetros de revestimento R_{int} , localizados em $z = 12, 5$ e $z = 25$ respectivamente.

As análises prévias da abertura anular e da eficiência do deslocamento, através da figura 3.6, demonstram que a variação do R_{int} , por si só, não oferece forte influência no desenvolvimento do deslocamento entre os dois fluidos. Desta forma, conforme exposto anteriormente, será adotado uma dimensão padronizada de revestimento, correspondente à $R_{int} = 0.80$, cuja dimensão se aproxima da grande maioria das aplicações de campo convencionais,

considerando-se a razão entre diâmetro de revestimento e diâmetro de poço aberto.

No presente trabalho, conforme abordado anteriormente, a configuração de poço adotada tem dimensões de diâmetro nominal de revestimento de $6\frac{5}{8}$ e poço aberto de $8\frac{1}{2}$, condizentes com uma razão correspondente a $R_{int} = 0.8$.

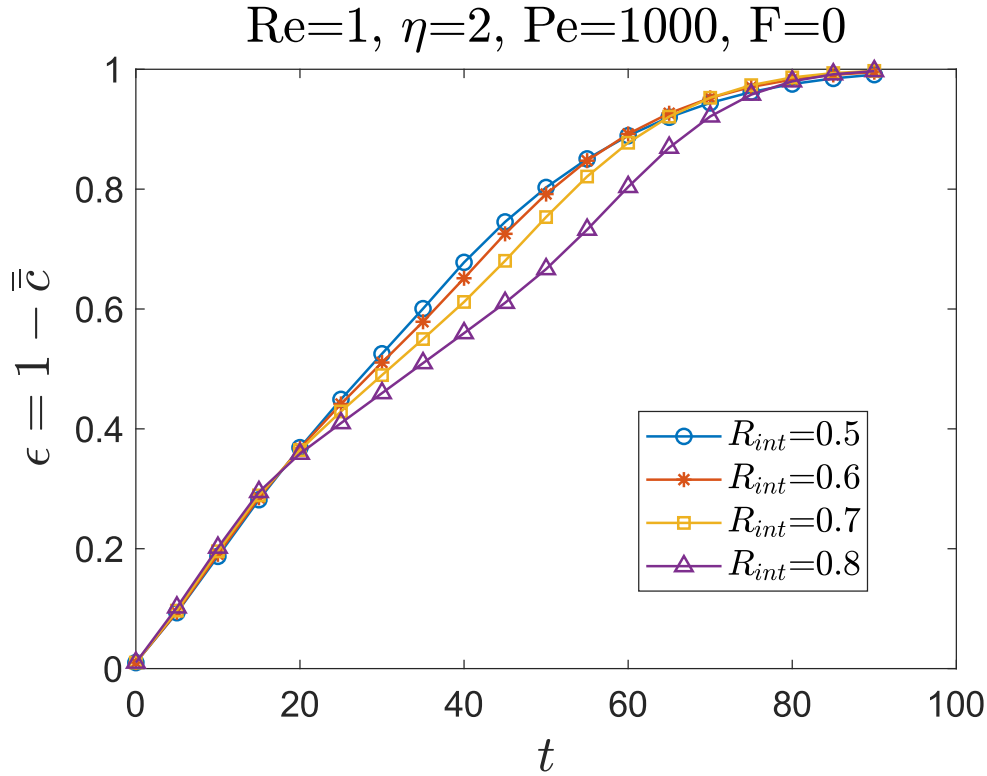


Figura 3.6: Eficiência do deslocamento ϵ , calculada a partir da média da concentração em relação aos eixos radial e axial (r e z respectivamente), para um intervalo de tempo adimensional $0 < t < 90$, para diferentes raios internos R_{int} .

3.2.2

Influência das Dimensões da Expansão Abrupta - Aumento do Comprimento Axial L do *Washout*

O aumento do comprimento longitudinal do *washout* poderá ocorrer devido à diversas circunstâncias operacionais, cuja ocorrência tem potencial de comprometer a integridade da operação primária de cimentação, consequentemente levando a problemas como vazamentos de revestimento ou perdas de produção.

O aumento no comprimento do *washout* pode ser influenciado por vários fatores, incluindo as propriedades reológicas da pasta de cimento, fatores operacionais, a geometria do poço e as condições e ambientes de poço.

Como exemplo, uma viscosidade da pasta de cimento excessivamente alta intensifica as forças de fricção contra as paredes do poço aberto, dificultando seu posicionamento e a correta instalação no anular, entre o revestimento e o poço aberto, podendo ser uma das causas do aumento do comprimento do *washout*. Da mesma forma, taxas de fluxo inadequadas com o tipo de formação do reservatório poderão resultar em um comprimento de *washout* mais longo. Contudo, a ocorrência de longos trechos de *washouts* está geralmente associado à formações com rochas pouco consolidadas, como arenitos mais homogêneos, [1], [3], [11] e [12].

De forma geral, minimizar o comprimento do *washout* durante a cimentação primária é importante para garantir a estabilidade e integridade do poço e conseqüentemente garantir a manutenção de sua vida produtiva.

Algumas análises a respeito da influência do aumento do comprimento na eficiência do deslocamento entre dois fluidos foram realizadas. RENTERIA et al. (2018) [30] estudaram a eficiência do deslocamento na cimentação primária em seções de *washout* em poços altamente desviados. Após uma sequência de simulações, o autor afirma que o aumento do comprimento do *washout* não aparenta resultar em qualquer efeito positivo ou negativo para a eficiência do deslocamento.

Para a análise da influência da variação do comprimento do *washout*, foram utilizadas três geometrias com comprimentos distintos de *washouts*, utilizando-se das mesmas propriedades hidrodinâmicas e viscosidades.

- Número de *Reynolds* ($Re = 1$);
- Número de *Péclet* ($Pe = 1000$);
- Número de *Galilei* ($F = 0$);
- Razão entre Viscosidades ($\eta = 2$);

A análise gráfica dos resultados das simulações numéricas demonstram que, a variação do comprimento do *washout*, não apresenta influência significativa na performance do deslocamento dos fluidos ao longo da abertura anular. Para interpretação da figura 3.7, o leitor deve novamente ter como referência a figura 3.1, que representa o modelo geral simplificado do poço.

Através de uma primeira análise qualitativa da figura 3.7, observa-se que as isolinhas referentes às frentes de propagação da concentração para $c \approx 0$, do fluido deslocador (*Fluido 1*), sofrem uma advecção através de z , com uma mesma velocidade axial e permanecem praticamente inalteradas, independentemente do instante de tempo ou comprimento do *washout*, comprovando que a performance do deslocamento não sofre alteração importante com a variação do comprimento do *washout*.

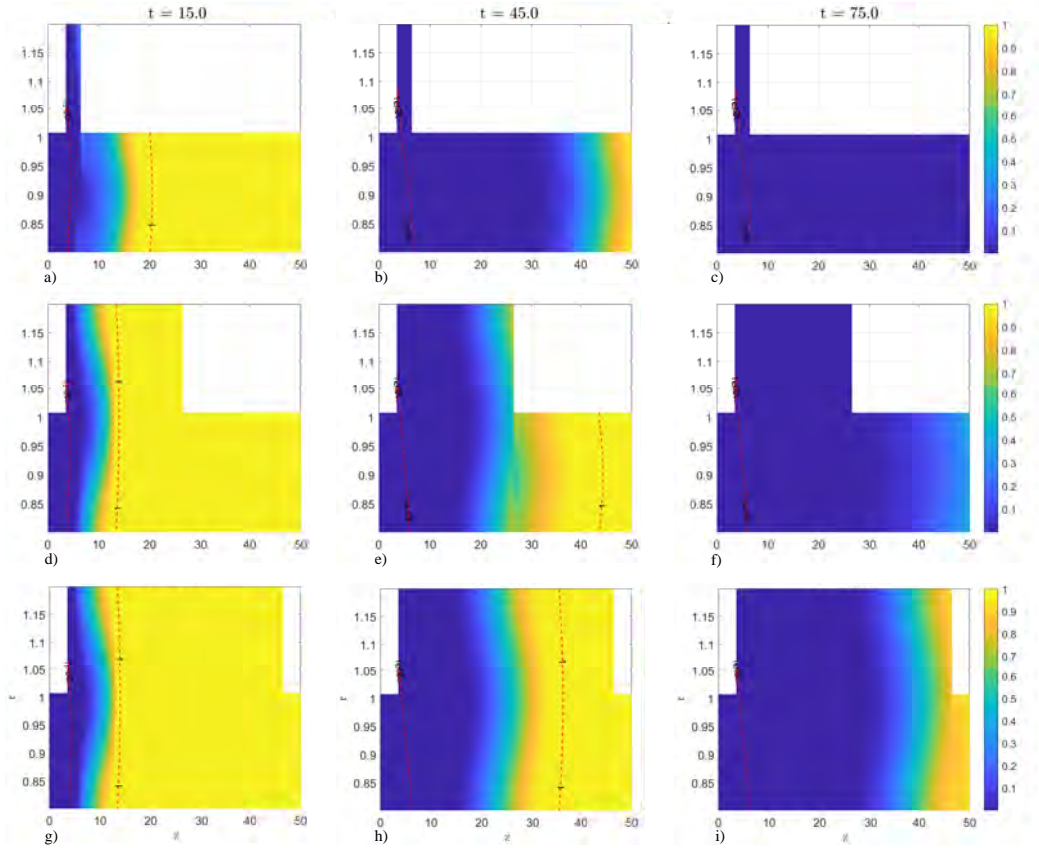


Figura 3.7: Representações gráficas das simulações dos perfis de concentração para os instantes, da esquerda para direita, $t = 15$, $t = 45$ e $t = 75$, para comprimentos de *washouts*, de cima para baixo, de $L = 3$, $L = 23$ e $L = 43$, respectivamente. A linha à esquerda de cada gráfico representa a isolinha de concentração $c \approx 0$, correspondente ao fluido deslocador (*Fluido 1*) e a isolinha da direita correspondendo ao fluido deslocado com concentração $c \approx 1$.

Através da figura 3.8, mostramos a eficiência do deslocamento através do cálculo da média das concentrações em relação aos eixos axial z e radial r .

Através da observação da figura 3.8, é possível constatar que, o comprimento da mistura caracterizado pela concentração média em relação aos eixos z e r , diminui à medida em que se aumenta o comprimento do *washout*, contudo esta variação entre as concentrações médias ao longo do tempo pode ser explicada pelas diferenças de área das seções para diferentes comprimentos de *washout*, e consequentemente, de volume de fluido ocupado por cada uma das 3 situações. A menor eficiência observada para $L = 43$ pode ser traduzida pelo maior volume do domínio em z . Desta forma, o instante $t = 90$ representa um estágio intermediário de todo o processo. Caso tempos mais longos sejam considerados, a curva em amarelo da figura 3.8, para $L = 43$, também deverá alcançar valores próximos de $\epsilon = 1$. Portanto concluímos que, *washouts* mais

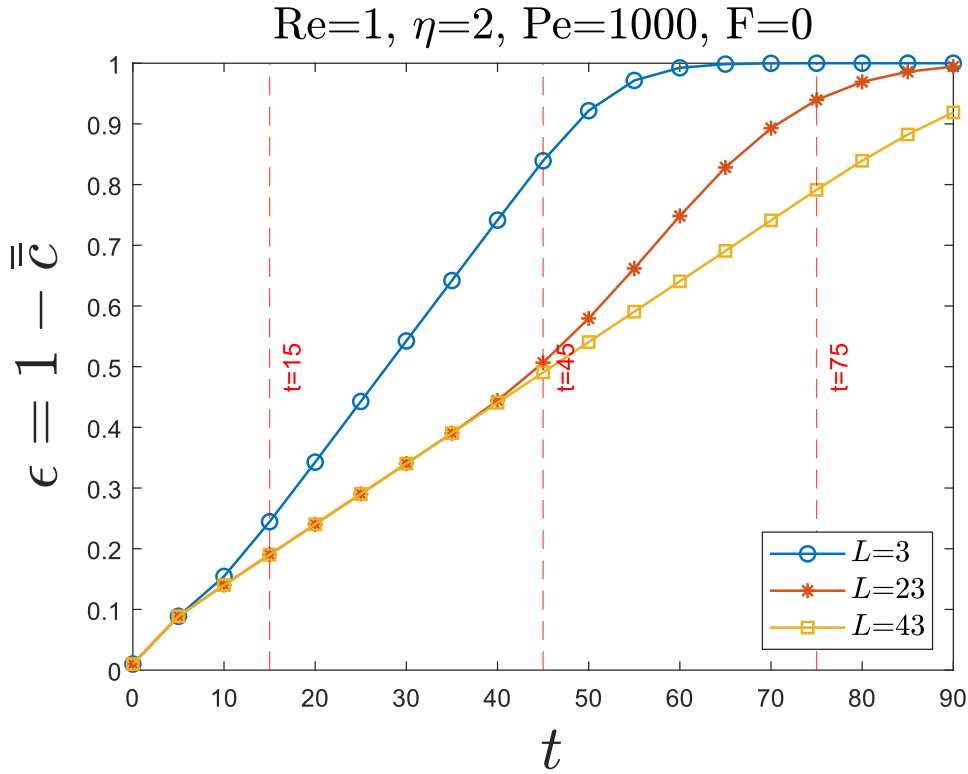


Figura 3.8: Eficiência do deslocamento ϵ , calculada a partir da média da concentração em relação aos eixos radial e axial (r e z respectivamente), para um intervalo de tempo adimensional $0 < t < 90$, para diferentes comprimentos de *washout*.

longos conferem um maior volume a ser deslocado, necessitando de um intervalo de tempo mais longo de deslocamento para que todo o espaço preenchido pelo fluido a ser deslocado *Fluido 1* seja completamente ocupado pelo fluido injetado *Fluido 2*.

Durante as próximas seções dos estudos dos parâmetros hidrodinâmicos e viscosidades, utilizaremos um comprimento adimensional fixo de *washout* de $L = 23$, equivalente à configuração geométrica do gráfico 3.7 (segunda linha de cima para baixo), correspondente à um comprimento de *washout* de 248.29 cm, conforme tabela 3.3.

3.2.3

Influência das Dimensões da Expansão Abrupta - Profundidade Radial H do Washout

O tamanho e a forma do volume que flui através do *washout* tornam-se independentes de sua profundidade e geometria, se o *washout* for suficientemente profundo. À medida que a profundidade de *washout* aumenta, torna-se assim cada vez mais difícil mobilizar o fluido de perfuração deixado nele. Ao

mesmo tempo, a forma exata do *washout* pode não exercer efeitos no deslocamento através destes *washouts* mais profundos. ROUSTAEI et al. (2015) [5].

Durante o processo de deslocamento do fluido de perfuração, um diâmetro externo mais acentuado dos *washouts* também poderá afetar a eficiência do deslocamento, que se refere à capacidade de um fluido deslocar e remover o fluido de perfuração do anular do poço. Normalmente, *washouts* de maiores diâmetros poderão resultar em um maior volume de fluido sendo deslocado e isso poderá aumentar as chances de canalização de fluido ou criar um caminho preferencial para o fluido contornar a área a ser cimentada. Para mitigar esses riscos, é importante monitorar cuidadosamente o processo de deslocamento e realizar o ajustamento das taxas de bombeio e a composição dos fluidos, conforme seja necessário, para garantir que o fluido de perfuração esteja sendo efetivamente deslocado.

RENTERIA et al. (2018) [30] propõe que, quanto maior a dimensão do diâmetro do *washout*, maior quantidade de fluido residual e como consequência, resultando em menores eficiências volumétricas de deslocamento. A figura 3.9 mostra a eficiência volumétrica aumentando com o tempo, porém são menores para *washouts* mais profundos. Em seus experimentos e simulações, os autores mantiveram a reologia do fluido de perfuração o mais leve possível, contudo o aumento na tensão limite de escoamento do fluido de perfuração pode resultar em eficiências ainda mais drasticamente reduzidas.

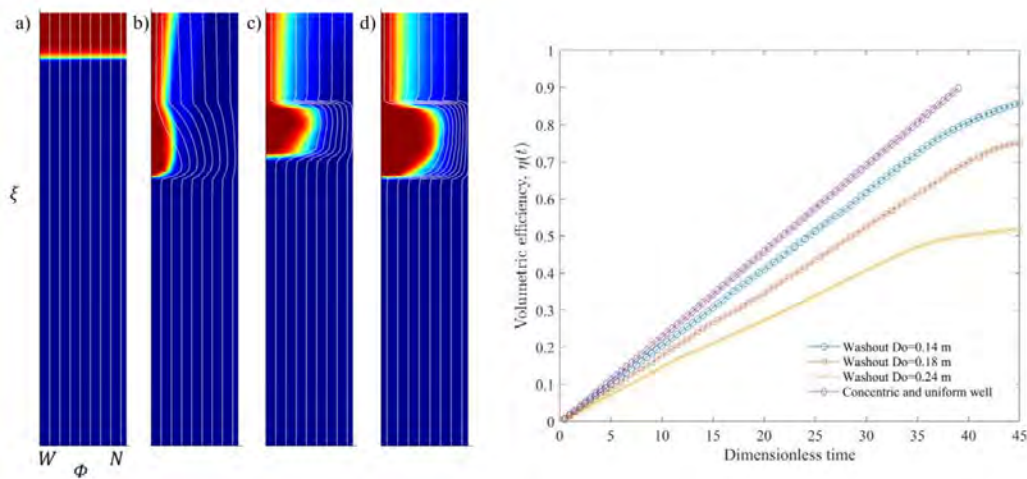


Figura 3.9: RENTERIA et al. (2018) [30] : Deslocamento através de tubos concêntricos com diferentes profundidades de *washouts*. Na esquerda, simulações em diversos instantes de tempo e na direita a eficiência volumétrica ao longo do tempo para diversas profundidades de *washouts*.

A redução do desempenho do deslocamento do fluido de perfuração em virtude do aumento do diâmetro do *washout* é um efeito físico intuitivamente esperado e os resultados analisados nesta seção apresentam respostas qualitativamente em consonância com este comportamento.

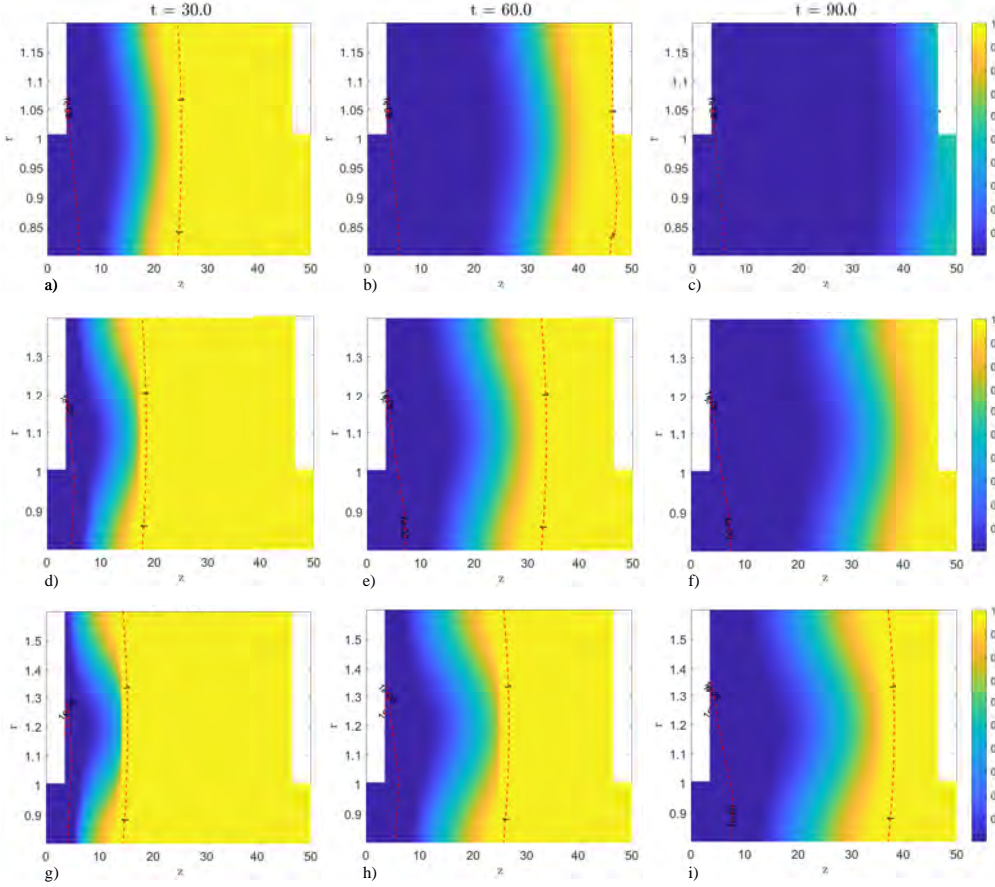


Figura 3.10: Representação gráfica das simulações das frentes de propagação da concentração para comprimentos radiais adimensionais de *washouts*, de cima para baixo: $H = 0.2$, $H = 0.4$ e $H = 0.6$. Nos instantes de tempos adimensionais, da esquerda para direita de: $t = 30$, $t = 60$ e $t = 90$. Demonstrando as isolinhas de propagação da concentração para o *Fluido 1*, $c \approx 0$ e *Fluido 2*, $c \approx 1$.

Nossas simulações podem ser observadas através da figura 3.10, que mostra uma sequência de deslocamentos com a ampliação da profundidade do *washout*, para diversos instantes de tempo. Por meio da visualização da isolinha de concentração correspondente a $c \approx 0$, é possível constatar a redução do desempenho do deslocamento do fluido injetado a medida que se expande o diâmetro externo do *washout*. Observar que, o diâmetro do revestimento, correspondente à variável adimensional R_{int} , é sempre mantida constante em 0.5, como valor referencial para esta análise geométrica.

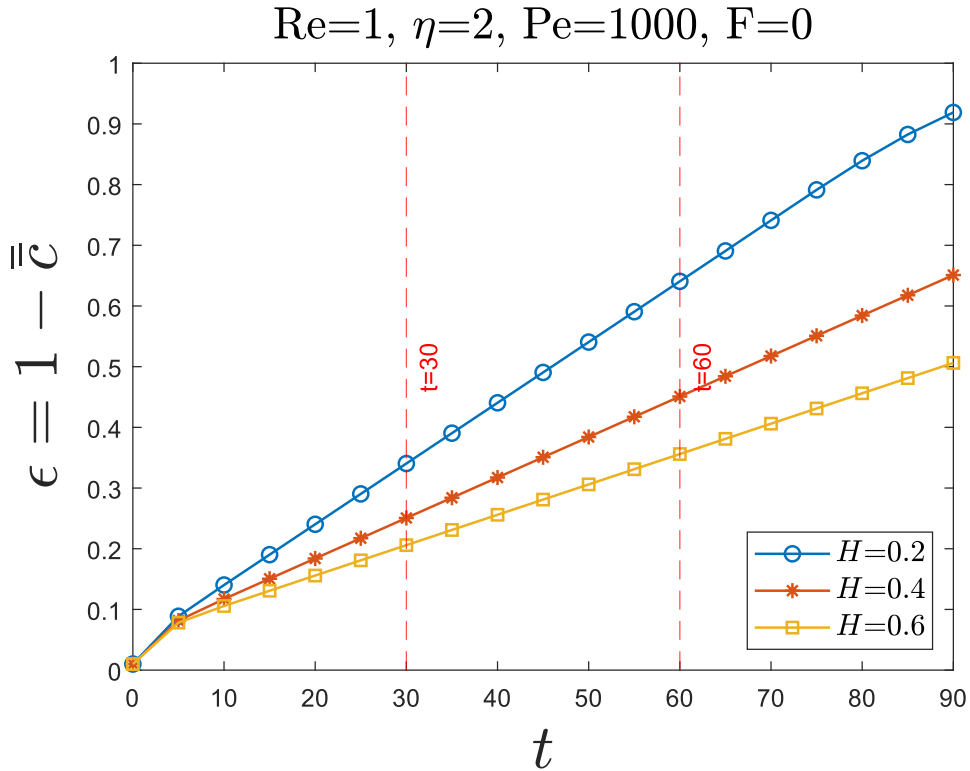


Figura 3.11: Eficiência do deslocamento ϵ , calculada a partir da média da concentração em relação aos eixos radial e axial (r e z respectivamente), para um intervalo de tempo $0 < t < 90$ para diâmetros externos de *washout* de $H = 0.2$, $H = 0.4$ e $H = 0.6$.

Os valores adimensionais das profundidades dos *washouts*: $H = 0.2$, $H = 0.4$ e $H = 0.6$, equivalem aos valores dimensionais, (abordando-se como parâmetro de arquitetura de poço previamente estipulado de $8\frac{1}{2} \times 6\frac{5}{8}$) de: 2.159 cm , 4.318 cm e 6.477 cm respectivamente, conforme empregado anteriormente pela tabela 3.3.

O comportamento do desempenho do deslocamento pode ser ainda melhor visualizado de forma gráfica através das simulações ilustradas através da figura 3.11 demonstrando que, a concentração média em relação aos eixos z e r em função do tempo, aumenta com a redução do diâmetro externo do *washout*. A figura reflete o comportamento nos instantes já anteriormente demonstrados na figura 3.10, através das linhas vermelhas pontilhadas enfocando os instantes de tempo adimensionais em $t = 30$, $t = 60$ e $t = 90$.

De maneira análoga às outras análises geométricas, será abordado como referência para as próximas análises e sequência de simulações numéricas dos parâmetros hidrodinâmicos e viscosidades, um valor fixo para a profundidade do *washout* em $H = 0.2$.

3.3

Análise do Comportamento Hidrodinâmico Segundo Parâmetros Hidrodinâmicos e Viscosidades

Nesta seção avançaremos através da análise dos diversos parâmetros adimensionais mais relevantes para o estudo. Foram realizadas aproximadamente 150 simulações variando-se cada um dos parâmetros adimensionais: número de Reynolds (Re), número de Péclet (Pe), número de *Galilei* (F) e razão entre viscosidades (η).

De forma a simplificar e facilitar a interpretação dos diversos resultados, utilizaremos uma configuração geométrica fixa. A tabela 3.1 remonta a estratégia utilizada para as análises dos diversos parâmetros hidrodinâmicos e de viscosidade e a figura 3.12 ilustra nossa configuração geométrica em questão a ser considerada durante toda esta seção.

O eixo z representa o domínio do comprimento axial da seção a ser analisada, com um *washout* determinado por um comprimento adimensional $L = 23$, com domínio $3.5 \leq z \leq 26.5$ e o eixo r é o domínio para os raios externos do revestimento $R_{int} = 0.80$, poço aberto $R_{ext} = 1$ e um domínio da profundidade da expansão determinado por $1 \leq r \leq 1.2$, com profundidade $H = 0.2$.

Fixamos esta configuração geométrica $N_x \times N_y$ em um domínio composto por uma malha retangular uniforme de 4000 pontos ao longo do eixo z e 161 pontos ao longo do eixo r .

Lembrando novamente, que o modelo simplificado em questão considera um poço vertical.

3.3.1

Regime de Fluxo do Deslocamento - Influência do Número de *Reynolds*

Durante uma operação de cimentação e processo de deslocamento, a análise do parâmetro adimensional do número de *Reynolds* está sempre associada à vazão de bombeio e portanto relacionada às velocidades de injeção no interior do anular entre o revestimento e o poço aberto.

Com o objetivo de uma investigação mais sistematizada e a fim de tornar o trabalho mais relevante para a aplicação em cimentação de poços, estudamos os efeitos do aumento da taxa de fluxo de forma independente, fixando-se todos os outros parâmetros adimensionais, conforma abaixo:

- $Pe = 1000$
- $\eta = 2$
- $F = 0$

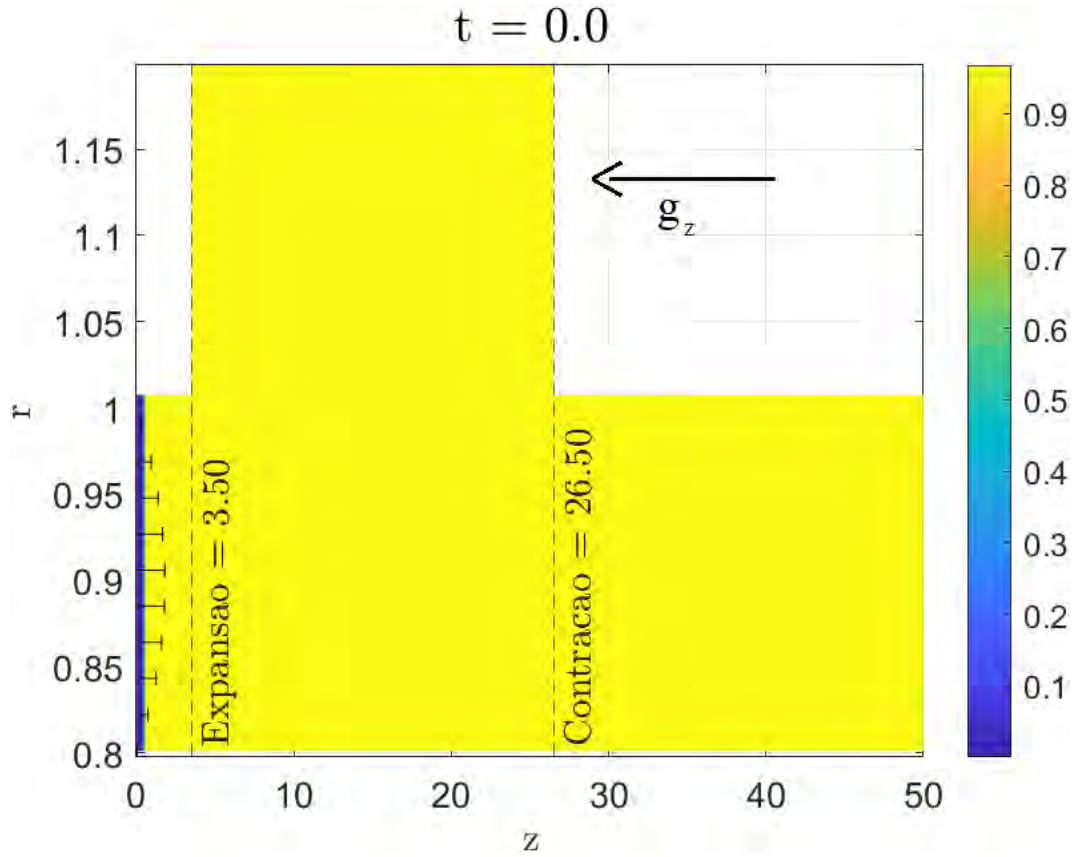


Figura 3.12: Gráfico que ilustra a geometria, domínios e condições de contorno utilizadas durante o estudo dos parâmetros hidrodinâmicos e reológicos.

Os parâmetros adimensionais acima foram calculados através das seguintes grandezas absolutas:

- $\mu_1 = 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (Viscosidade dinâmica do fluido injetado).
- $\mu_2 = 0.74 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (Viscosidade dinâmica do fluido deslocado).
- $\rho_1 = \rho_2 = 1577 \text{ kg/m}^3$ (Deslocamento isodenso)
- $R_{ext} = 4.25 \text{ pol}$ (Raio do poço aberto).
- $Q = 0.003 \text{ bpm}$ (Vazão de Injeção).
- $D = 9.83 \cdot 10^{-5} \text{ pol}^2/\text{s}$ (Difusividade de partículas).

Onde, Pe é o número de *Péclet*, η é a razão entre viscosidades e F é o parâmetro gravitacional ou número de *Galilei*. Assumimos valores fixos para *Péclet* (Pe) e número de *Galilei* (F) como premissas, com o objetivo de analisarmos isoladamente os efeitos do número de *Reynolds*, visto que, assim como o número de *Reynolds*, os parâmetros adimensionais: Número de *Péclet* (Pe) e número de *Galilei* (F) também são dependentes e funções da velocidade média (U).

Utilizamos as seguintes vazões de bombeio para a composição de cada correspondente número de *Reynolds* (Re) :

- $Re = 1 \quad \mapsto \quad Q = 0.003 \text{ bpm}$
- $Re = 250 \quad \mapsto \quad Q = 0,8 \text{ bpm}$
- $Re = 1250 \quad \mapsto \quad Q = 4 \text{ bpm}$
- $Re = 2000 \quad \mapsto \quad Q = 6.4 \text{ bpm}$

O processo básico para realização de uma cimentação primária é o bombeamento de um sistema cimento+espaçador utilizado para o deslocamento do fluido de perfuração, através do qual, um volume de cimento é bombeado no anular, entre o revestimento e o poço aberto, a fim de reverter (*bottom up*) e substituir este fluido de perfuração por cimento neste anular.

As taxas de vazão poderão variar de forma significativa, à depender de diversos fatores relacionados com o ambiente de poço, normalmente o deslocamento é realizado em regime turbulento, sendo geralmente a técnica de bombeio mais utilizada, porém nem sempre a mais eficaz. [3].

Existem diversas circunstâncias relacionadas com condições geológicas, limites operacionais e outras condições de poço que devem ser obedecidas e que podem tornar a utilização da estratégia de bombeamento dentro do regime turbulento pouco eficiente. Valores de vazão de bombeio tipicamente utilizados em cimentação de poços com revestimentos de $6\frac{6}{8} \text{ pol}$ em poço aberto de $8\frac{1}{2} \text{ pol}$ podem variar de 1 a 15 *bpm* [1] [3], em nosso caso, utilizaremos valores correspondente à cada um dos números de *Reynolds* escolhidos para nossas análises: 1, 250, 1250 e 2000, com a finalidade de manutenção dos deslocamentos contidos no envelope de regime laminar.

O número de *Reynolds* (Re) é uma grandeza adimensional que relaciona o transporte advectivo e o difusivo no escoamento de fluidos e portanto, associa as forças inerciais e viscosas de um fluido durante um determinado escoamento, sendo definido pela expressão abaixo:

$$Re = \frac{\rho_1 U R_{ext}}{\mu_1} \quad (3-1)$$

Um dos fenômenos a serem identificados é a interferência do campo de velocidades, diretamente relacionado com o número de *Reynolds*, na propagação da frente de concentração durante o deslocamento entre dois fluidos e suas particularidades, no caso da presença de uma expansão abrupta. Neste sentido, foram realizadas diversas simulações que são mostradas conforme figura 3.13.

Na figura 3.13 mostramos o comportamento das interfaces de concentração para diferentes números de *Reynolds*, $Re = 1, 250, 1250$ e 2000 (de cima para baixo), para diferentes instantes de tempo, $t = 15, 30$ e 45.

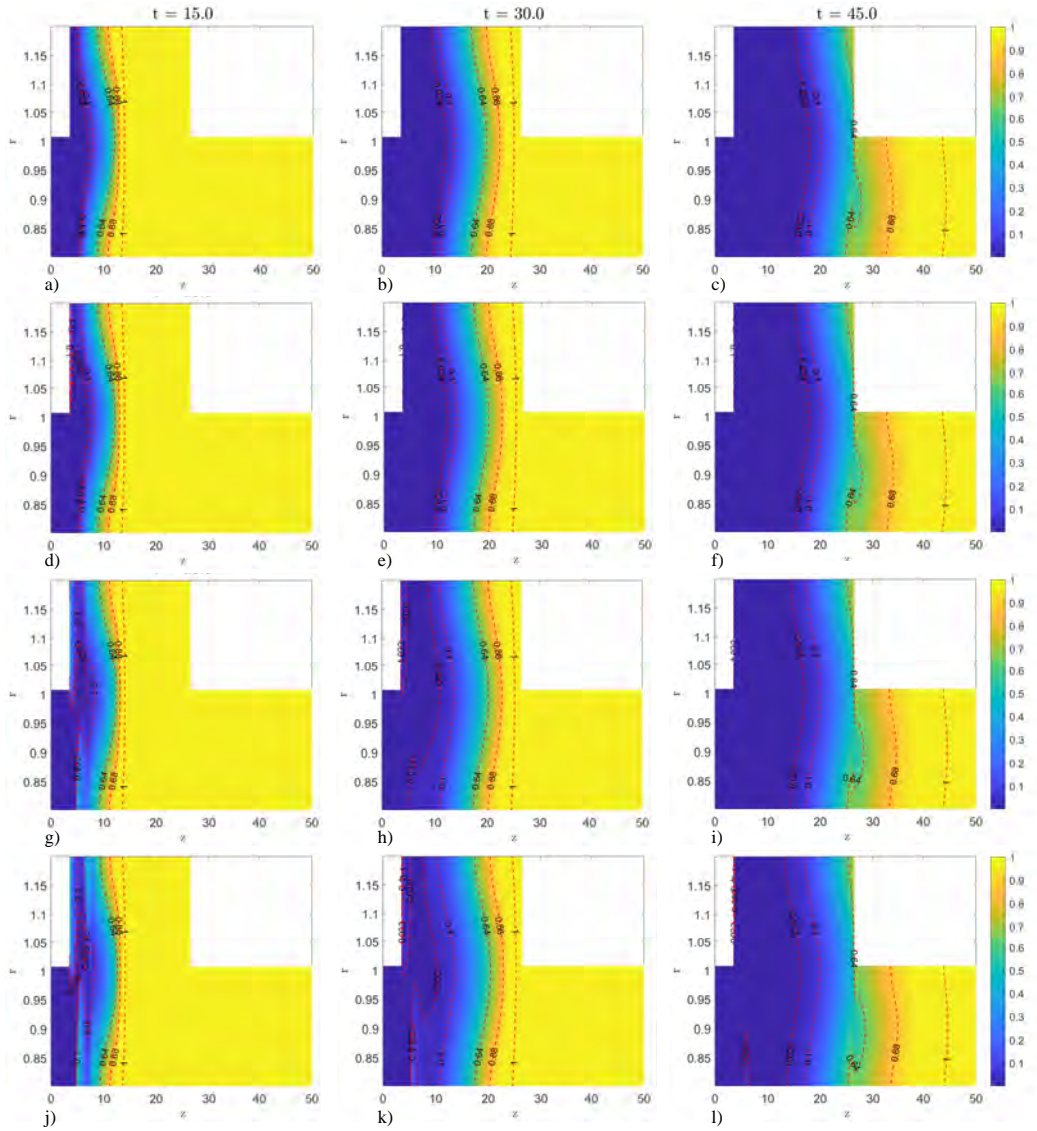


Figura 3.13: Simulações da propagação das frentes de concentração para os instantes de tempo : 15, 30 e 45; da esquerda para direita; para números de *Reynolds*: 1, 250, 1250 e 2000; de cima para baixo.

É possível observar que o preenchimento dos espaços ocupados pelo *Fluido 2* (fluido deslocado, em amarelo) por meio do fluido injetado (*Fluido 1*, em azul), é realizado de forma mais uniforme, gerando perfis mais estáveis, para números de *Reynolds* mais baixos (Figura 3.13: a, b, c, d, e, f), principalmente nos instantes iniciais do escoamento, quando o fluido injetado movimenta-se através da expansão localizada em $z = 3.5$.

No instante $t = 45$ (Figura 3.13: c, f, i e l), os contornos de concentração encontram-se dentro da região expandida, porém distantes da expansão e da contração. Vemos o comportamento das interfaces apresentarem uma tendência de total preenchimento do espaço ocupado pelo *Fluido 2* através do fluido injetado, *Fluido 1*.

Para número de *Reynolds* maiores, as isolinhas de concentração plotadas em vermelho (0.033, 0.1, 0.64, 0.88 e 1) comprovam a observação anterior, no qual observa-se um contorno mais fechado das isolinhas no instante em que o fluido injetado entra na expansão e se estabiliza à medida que ocupa os espaços da seção erodida (*washout*). O efeito da miscibilidade entre os fluidos influencia fortemente para a dissipação da instabilidade entre os dois fluidos durante a passagem pela expansão na seção erodida.

Em complemento à figura 3.13 plotamos as curvas de concentração média para os números de *Reynolds* 1, 250, 1250 e 2000, utilizando-se diversos instantes de tempo, conforme mostrado pelas figuras 3.14 a), b), c) e d), respectivamente.

As curvas médias de concentração (figura 3.14) são calculadas a partir da média aritmética ao longo do eixo radial r para cada um dos 4000 pontos do domínio no eixo axial z e demonstram a miscibilidade entre os fluidos para um deslocamento com alta difusão.

As curvas plotadas em sequência temporal remontam a história do escoamento através do *washout*. Os picos em cada uma das curvas nos instantes 15, 45, 60 e 75, das figuras 3.14 a), b), c) e d), demonstram um aumento abrupto da média da concentração do fluido deslocado durante a passagem pela expansão da erosão radial. Estas instabilidades ocorrem em decorrência da atuação de maiores forças inerciais e consequentemente, uma maior mistura entre os dois fluidos nos pontos de entrada da erosão, que são mais pronunciadas, conforme aumenta-se o número de *Reynolds*, como exemplo e conforme as figuras 3.13 g) e j).

A observação das curvas de cada um dos gráficos da figura 3.14, conforme aumentamos o tempo de exposição do deslocamento, ao longo do intervalo de tempo de escoamento simulado, $0 \leq t \leq 90$, a concentração média diminui em direção à 0, indicando o preenchimento do domínio considerado pelo fluido

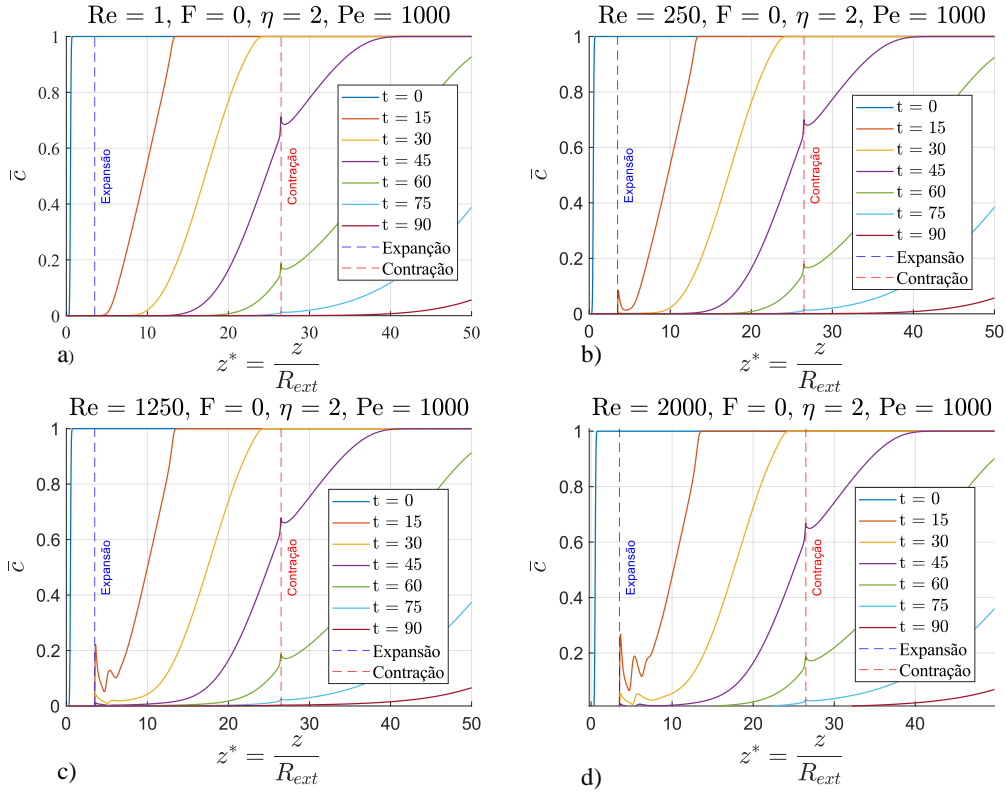


Figura 3.14: Simulações das curvas de concentração média, ao longo do eixo radial r no intervalo de tempo de escoamento $0 \leq t \leq 90$, para números de *Reynolds* 1, 250, 1250 e 2000, respectivamente a), b), c) e d), a influência de Re na média \bar{c} é observada para tempos curtos, próximo à expansão.

injetado (*Fluido 1* em azul), independentemente das instabilidades ocorridas nos instantes iniciais.

A semelhança e comportamento das curvas de concentração média nos instantes $t = 75$ e $t = 90$ (Curvas em azul e vermelho nas figuras 3.14 a), b), c) e d)) para cada número de *Reynolds*, corrobora com uma conclusão preliminar de que o aumento do número de *Reynolds* não afeta de forma significativa o deslocamento do fluido deslocado (*Fluido 2* em amarelo) pelo fluido injetado (*Fluido 1* em azul).

Os efeitos da curvatura axissimétrica da geometria e a utilização das equações de movimento e concentração em coordenadas cilíndricas são claramente observados na figura 3.15 a), c), e) e g). A assimetria das isolinhas de concentração, melhor observada na figura 3.15 a), demonstra um ligeiro avanço do fluido injetado na parte mais interna do anular, e uma distribuição assimétrica de velocidades ao longo do eixo r , com menores velocidades presentes na parte mais externa dos anulares, figuras 3.15 b), d), f) e h), concordando com a premissa que: a utilização de um modelo matemático em coordenadas ci-

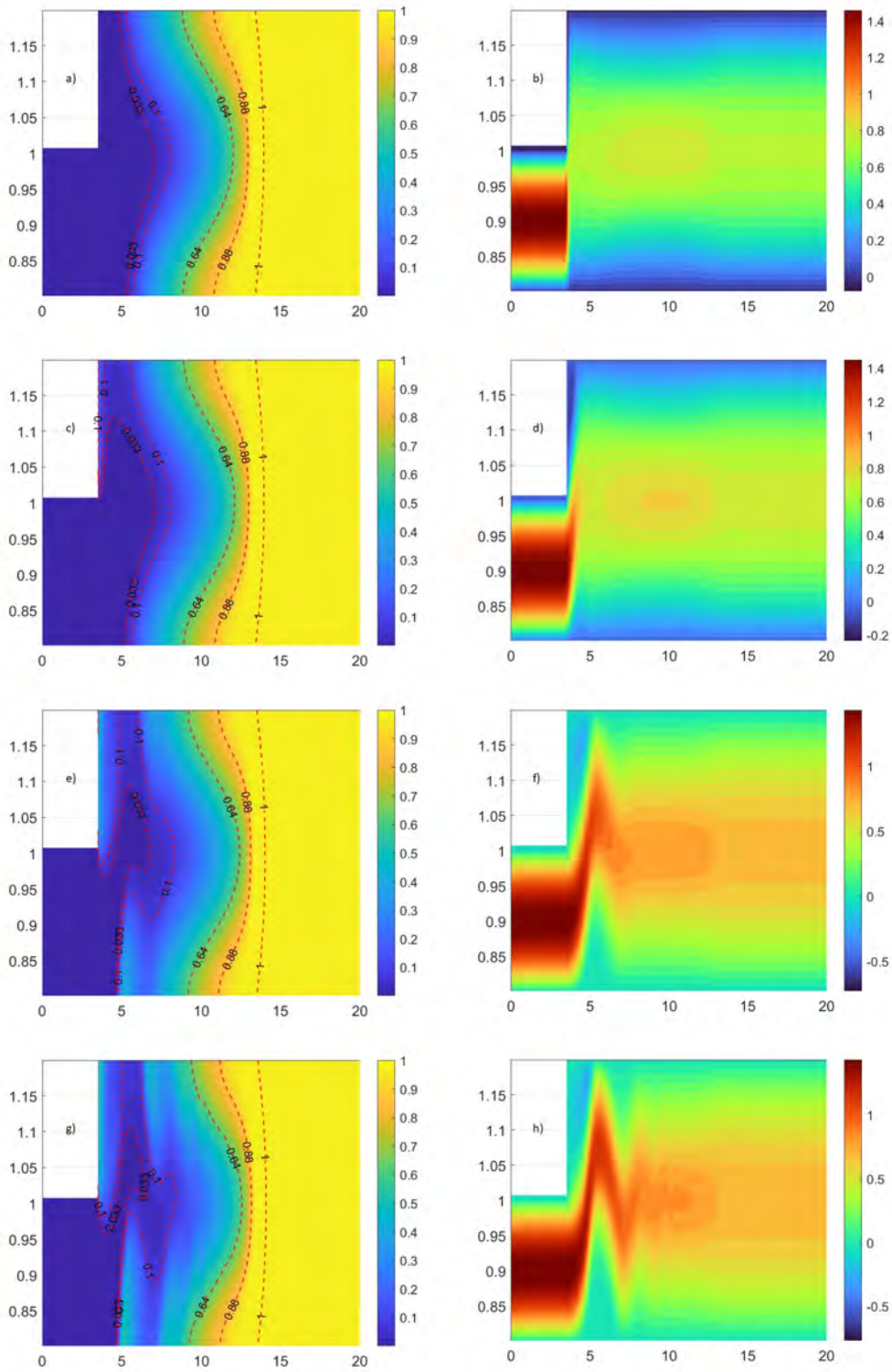


Figura 3.15: Vista ampliada da frente de propagação de concentração, gráficos à esquerda, onde $0 \leq z \leq 20$ para o instante adimensional $t = 15$, com números de *Reynolds* (1, 250, 1250 e 2000, de cima para baixo) e seus respectivos campos de velocidade v_z , gráficos à direita.

líndricas, permite uma visualização mais detalhada e completa dos fenômenos físicos presentes neste tipo de análise hidrodinâmica.

Uma outra característica demonstrada pela figura 3.15 é a evidente presença de recirculação de fluido para *Reynolds* mais altos, com velocidades axiais v_z negativas, ocorrendo logo na parte superior da entrada da expansão (Figuras 3.15 f) e h)).

O fluido injetado é desacelerado imediatamente durante seu ingresso na erosão expandida, localizada em $z = 3.5$. Para *Reynolds* mais altos, observamos a prevalência das forças inerciais e uma advecção localizada mais pronunciada, forçando a propagação da frente de concentração do *Fluido 1* para cima, à medida que desloca os espaços preenchidos pelo *Fluido 2*. Esta inflexão ascendente abrupta da frente de concentração do fluido injetado promove o início da formação das recirculações anteriormente citadas. Este fenômeno pode ser visualizado através da coloração mais avermelhada das simulações da 3.15 f) e h), sendo que, a viscosidade significativamente menor do fluido injetado (*Fluido 1*) possivelmente intensifica este fenômeno.

Conforme o escoamento avança no tempo, para instantes de tempo mais longos, as recirculações serão dissipadas em decorrência da miscibilidade entre os dois fluidos.

As recirculações na parte superior da porção da entrada da erosão expandida pode ser melhor observada por meio da figura 3.16 e) e f), onde é visível a formação de áreas com concentrações maiores, em áreas próximas a entrada e saída do *washout*, e através das figuras 3.16 f) e h) (linhas pontilhadas), que indicam regiões formadas por velocidades axiais v_z negativas.

Nestes gráficos (figura 3.16), utilizamos uma expansão de comprimento significativamente menor, $L = 2$ e domínio em $0 \leq z \leq 10$, onde é possível observar que, para *Reynolds* maiores, as forças inerciais tendem trespassar a zona erodida (*by-pass*). Devido a miscibilidade entre os fluidos, e conforme aumentamos o tempo de exposição do deslocamento, o *Fluido 1*, injetado, ocupará todos os espaços preenchidos anteriormente pelo *Fluido 2*, deslocado.

A figura 3.17 reproduz a evolução do campo de velocidades ao longo do eixo z , através de uma visão euleriana das velocidades axiais (v_z) e radiais (v_r), em $z = 2$, $z = 5$, $z = 25$, $z = 30$ e $z = 40$. Estas fotografias do comportamento das velocidades foram tomadas no instante $t = 45$, para diversos número de *Reynolds* (De cima para baixo : 1, 250, 1250 e 2000).

A decomposição do campo de velocidades nos eixos axiais e radiais complementa e corrobora com as observações anteriores com relação às recirculações no escoamento localizadas logo após a entrada da erosão expandida.

Analizando as curvas para $z = 5$, das figuras 3.17 e) e g), é possível

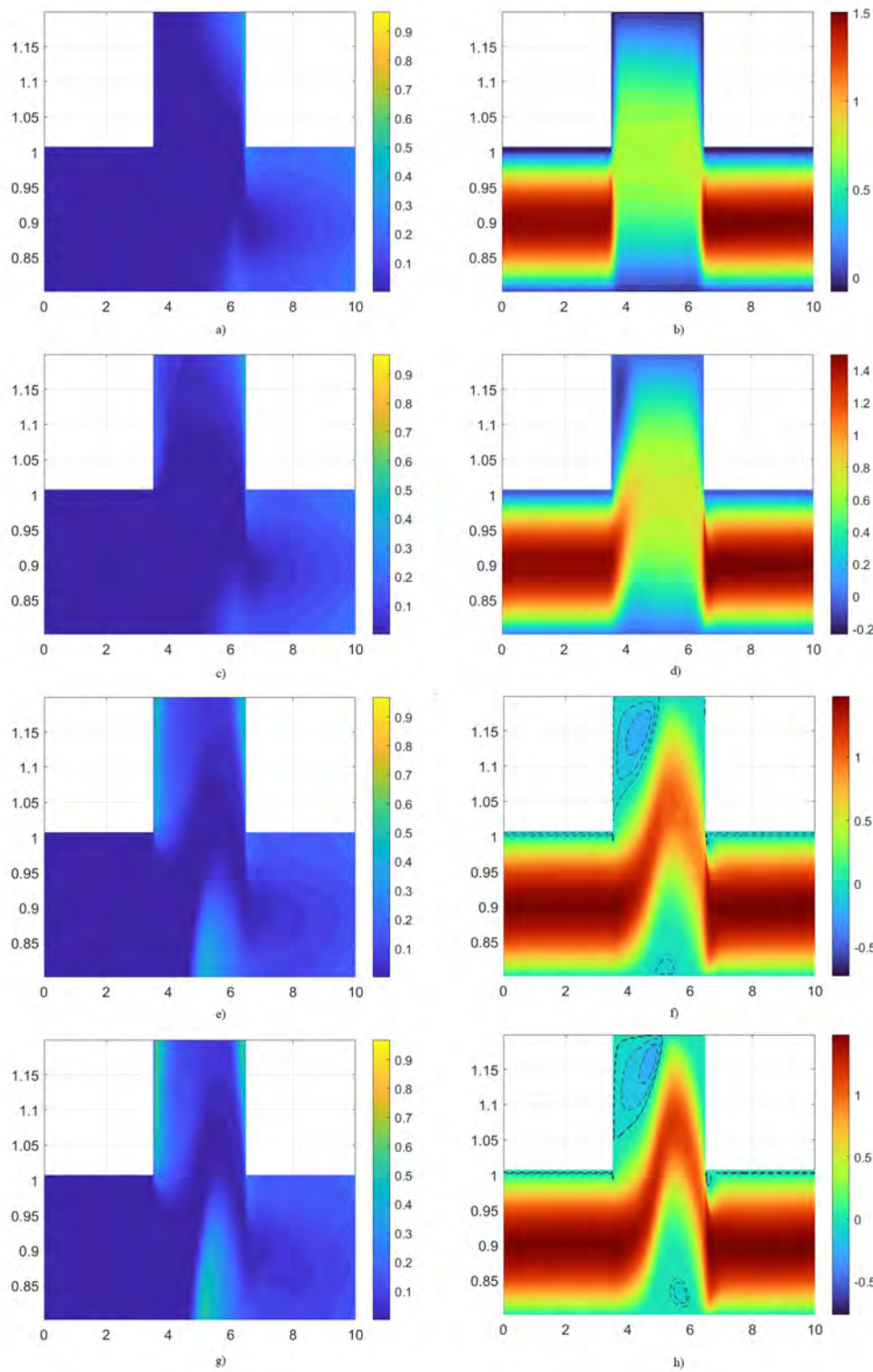


Figura 3.16: Vista ampliada da frente de propagação de concentração, onde $0 \leq z \leq 20$ para o instante adimensional $t = 15$, com números de *Reynolds* (1, 250, 1250 e 2000, de cima para baixo) e seus respectivos campos de velocidade axial v_z , figuras à direita. As curvas tracejadas mostram linhas de corrente e destacam regiões com recirculações.

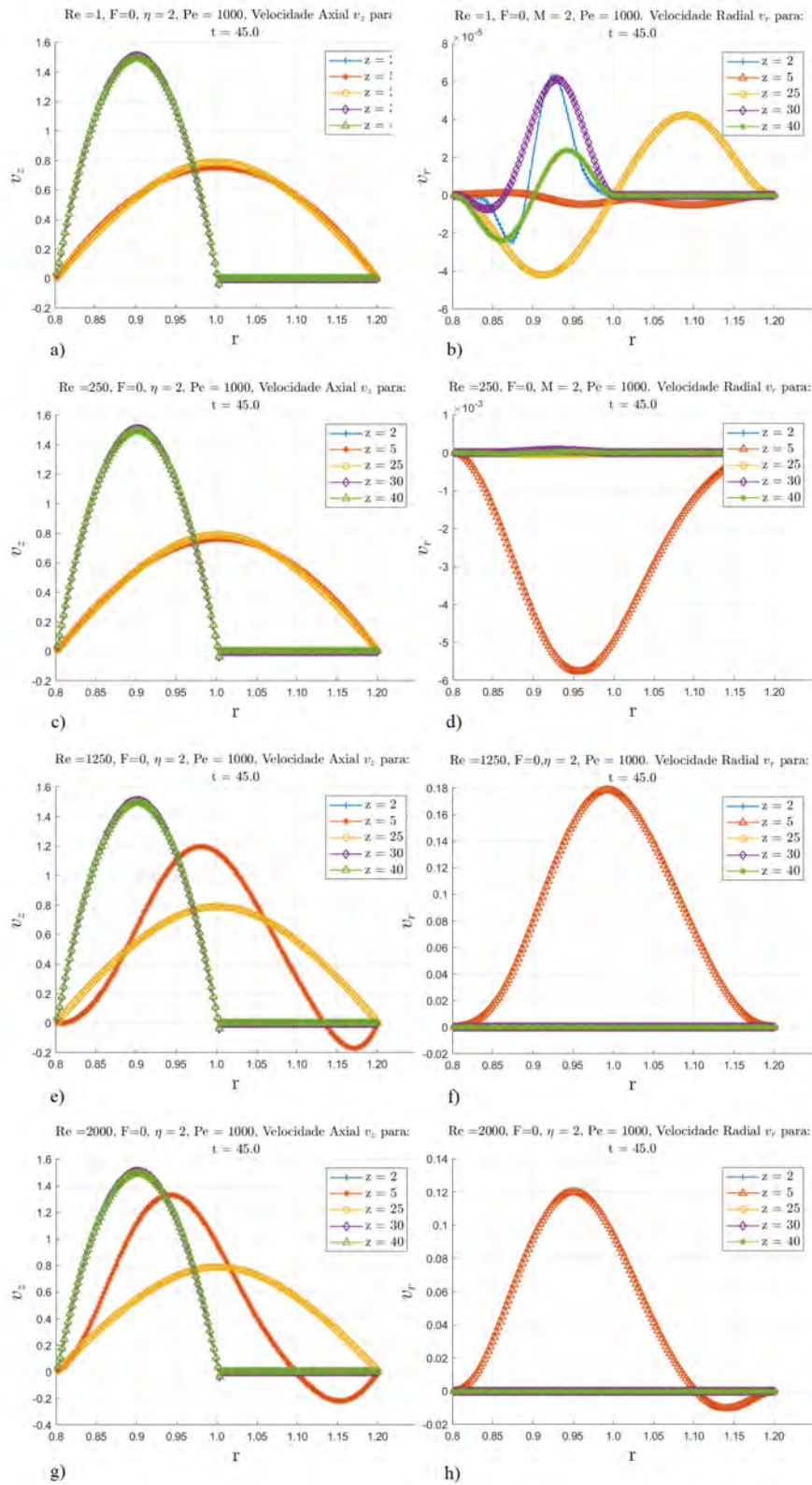


Figura 3.17: Decomposição do campo de velocidades em velocidades axiais v_z : a), c), e) e g) e velocidades radiais v_r : b), d), f) e h) para os números de *Reynolds* : 1, 250, 1250 e 2000, de cima para baixo, em pontos da coordenada z (2, 5, 25, 30 e 40).

observar velocidades axiais negativas v_z , ocorrendo aproximadamente nos intervalos em r de $1.125 < r < 1.20$ e $1.10 < r < 1.20$, respectivamente para os números de *Reynolds* correspondentes a 1250 e 2000. Da mesma forma, observa-se também, através das figuras 3.17 f) e h), velocidades radiais v_r positivas, com um pico de velocidade nas proximidades de $r = 1$ e mais evidentemente, uma inflexão da curva de velocidade radial v_r na figura 3.17 h) em aproximadamente $r = 1.10$, onde a inflexão da velocidade axial v_z é também observada, figura 3.17 g). Tal comportamento das componentes das velocidades axiais v_z e radiais v_r em determinados pontos ao longo do domínio radial r , ocorrendo logo na entrada dos *washouts*, dão indicações fortes de ocorrência de recirculações nestas regiões.

Outros trabalhos demonstram que a eficiência do deslocamento é fortemente influenciada pelo número de *Reynolds*. NACCACHE et al. (2018) [6] mostram, através do estudo entre pares de fluidos com diferentes reologias e baixa miscibilidade, que para baixos números de *Reynolds*, o processo é governado por efeitos viscosos, por outro lado, a inércia tem um efeito dominante à medida que Re é aumentado, deslocando a interface para a saída da região erodida e diminuindo a eficiência do deslocamento que é obtida através da razão entre a área erodida ocupada pelo fluido injetado e a área total da região expandida.

O gráfico da figura 3.18 mostra a eficiência do deslocamento em termos da concentração média, calculada em relação aos eixos radial r e axial z , ao longo de um intervalo de tempo $0 \leq t \leq 90$, para número de *Reynolds*: 1, 250, 1250 e 2000 e segundo os demais parâmetros adimensionais anteriormente considerados.

A observação da figura 3.18 identifica que, para o presente caso, o número de *Reynolds* não interfere de forma significativa a eficiência do deslocamento, apesar dos diferentes comportamentos hidrodinâmicos observados, principalmente durante a interação hidrodinâmica, entre as frentes de concentração e a expansão e contração da região erodida.

A figura 3.18 mostra valores de eficiência do deslocamento próximos de 100%. Possivelmente os valores dos parâmetros adimensionais não permitiram identificar de forma significativa a influência do número de *Reynolds* na eficiência do deslocamento através do cálculo da concentração média bidimensional. Adicionalmente, o fato de utilizarmos fluidos newtonianos e a miscibilidade entre os fluidos, parecem estabilizar, a longo prazo, os efeitos que seriam causados por fluidos não-newtonianos com tensão limite de escoamento. Segundo a literatura científica já anteriormente abordada, o deslocamento entre fluidos não-newtonianos, sujeitos a número de *Reynolds* mais elevados, podem tres-

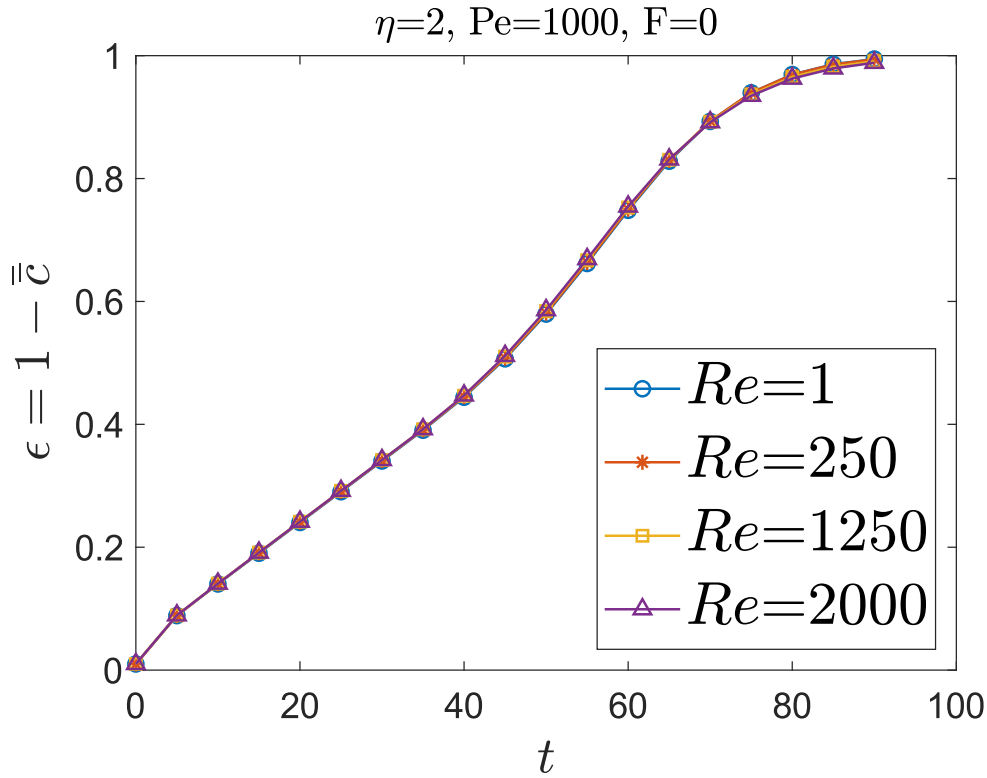


Figura 3.18: Eficiência do deslocamento ϵ , calculada a partir da média da concentração em relação aos eixos radial e axial (r e z respectivamente), no intervalo de tempo $0 \leq t \leq 90$, para diversos número de *Reynolds* : 1, 250, 1250 e 2000. Observamos que para $Pe = 1000$ e para a faixa de Re investigada, a eficiência de deslocamento não sofre alterações significativas.

passar por completo a região erodida, podendo resultar em menores eficiências do deslocamento.

3.3.2

Efeitos Advectivos e Difusivos - Influência do Número de Péclet

Em nosso estudo o número de *Péclet* tem uma importância fundamental para a análise do comportamento hidrodinâmico do deslocamento e interfaces dos perfis de concentração gerados durante o processo de escoamentos multifásicos, através do qual um fluido injetado substitui o volume preenchido por um outro fluido que deve ser deslocado.

O número de *Péclet* fornece informações importantes relativas aos transportes advectivo e difusivo, determinando qual o mecanismo dominante e qual o impacto que representa no comportamento geral do deslocamento e de como os fenômenos advectivo/difusivos podem afetar o comprimento de mistura na interface dos fluidos e consequentemente a eficiência do deslocamento.

O número de *Péclet* (Pe) é um parâmetro adimensional utilizado em

transporte de calor e massa que quantifica a relação entre advecção e difusividade de massa. Em nosso caso estamos interessados na relação entre o espalhamento (advecção mecânica) e a mistura (transferência molecular) entre o *Fluido 1* injetado, deslocando um segundo fluido, *Fluido 2*, por meio de um determinado campo de velocidades, gerando um campo de concentração. Matematicamente, o número de *Péclet* é expresso por :

$$Pe = \frac{UR_{ext}}{D} \quad (3-2)$$

Conforme definido anteriormente na seção referente às equações governamentais: U é a velocidade média de injeção ou do bombeio, R_{ext} é o comprimento característico (raio do poço aberto) e D é o coeficiente de difusão.

Durante toda e qualquer operação de cimentação primária de poços, diferentes fluidos, com características reológicas diversas, são bombeados através da coluna de revestimento e através do anular entre revestimento e poço aberto. Cada fluido tem uma função própria e particularidades específicas. Exemplificando, o espaçador deverá ser usado para a separação entre a pasta de cimento e fluido de perfuração já preexistente. Portanto as interações entre fluidos com diferentes constituições reológicas e características é frequente. Estas interações de transferência de massa, comportamentos hidrodinâmicos e reológicos entre fluidos durante o processo de escoamento bifásico resultam em uma interface de mistura, que evolui ao longo do tempo do deslocamento e é de importância crítica para o entendimento completo do comportamento hidrodinâmico e reológico do deslocamento.

Durante o deslocamento, a distribuição da concentração nas interfaces de mistura poderá variar de duas formas prescritas pelo número de *Péclet*. O espalhamento, ou advecção mecânica que ocorre devido a advecção da concentração através de um determinado campo de velocidades e uma segunda, através da mistura ou difusão molecular, que é determinada pelo coeficiente de difusão D .

O entendimento das características advectivo/difusivas entre os fluidos injetado e deslocado é de fundamental importância durante a pré-análise da operação ou um estudo numérico com a finalidade de antecipar potenciais causas de canalização e contaminações entre os dois fluidos, bem como a otimização de custos de material e recursos de bombeio.

Normalmente, fluidos de perfuração são classificados conforme dois tipos: fluidos base água (*WBDF : Water Base Drilling Fluid* e base óleo : (*OBDF : Oil Base Drilling Fluid*). De forma geral, fluidos base água WBDF são

miscíveis com outros fluidos a base água, e o termo relacionado com a difusão molecular (denominador do número de *Péclet*) é governante, por outro lado, fluidos de perfuração base óleo OBDF, são quase imiscíveis com fluidos base água, desta forma, o termo advectivo (numerador do número de *Péclet*) é potencialmente dominante. Em nosso trabalho utilizamos um largo espectro de fluidos miscíveis, que se aproximam mais do comportamento de um sistema de fluidos espaçadores deslocando um fluido de perfuração base água WBDF.

Savery et al. (2007) [18] utilizaram uma modelagem tridimensional para simular a mistura de fluidos de poço através de anular altamente excêntrico, com reciprocção e rotação do revestimento. Em seu trabalho, os autores simularam duas situações em diferentes intervalos de tempo ($t = 20s$, $t = 50s$ e $t = 100s$), utilizando diferentes coeficientes de difusão: $D = 3 \cdot 10^{-2} pol^2/s$, $D = 3 \cdot 10^{-4} pol^2/s$ e $D = 3 \cdot 10^{-6} pol^2/s$.

Para a análise da influência do número de *Péclet*, procuramos utilizar diversos números de *Péclet* de forma a abranger uma ampla gama de fluidos e aproximadamente da mesma magnitude que os utilizados por [18].

Abaixo descrevemos as relações entre números de *Péclet* relacionados com seus respectivos coeficientes de difusividade utilizados nas análises.

- $Pe = 1000 \quad \mapsto \quad D = 9.83 \cdot 10^{-5} pol^2/s$
- $Pe = 6000 \quad \mapsto \quad D = 1.64 \cdot 10^{-5} pol^2$
- $Pe = 10000 \quad \mapsto \quad D = 9.38 \cdot 10^{-6} pol^2/s$
- $Pe = 50000 \quad \mapsto \quad D = 1.97 \cdot 10^{-6} pol^2/s$

De forma análoga à seção anterior, os parâmetros fixos utilizados nas análises e estudos da influência do número de *Péclet* serão :

- $Re = 1$
- $\eta = 2$
- $F = 0$

As seguintes grandezas absolutas foram utilizadas para o cálculo dos parâmetros adimensionais acima:

- $\mu_1 = 0.1 Pa \cdot s$ (Viscosidade dinâmica do fluido injetado).
- $\mu_2 = 0.74 Pa \cdot s$ (Viscosidade dinâmica do fluido deslocado).
- $\rho_1 = \rho_2 = 1577 kg/m^3$ (Deslocamento isodenso)
- $R_{ext} = 4.25 pol$ (Raio do poço aberto).
- $Q = 0.003 bpm$ (Vazão de Injeção).

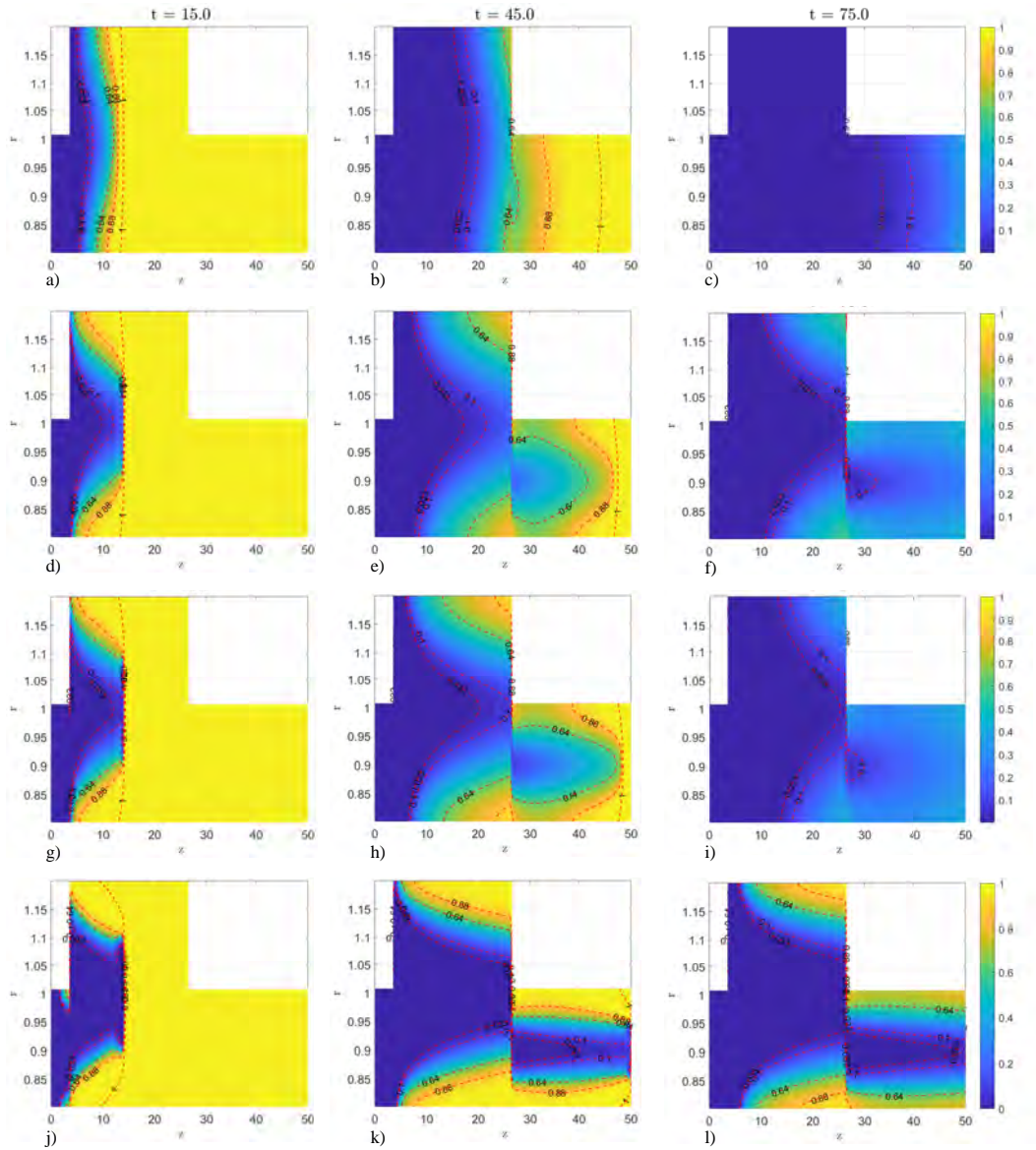


Figura 3.19: Simulações de diferentes perfis de propagação da concentração com diferentes números de Pe (de cima para baixo : 1000, 6000, 10000 e 50000), nos instantes de tempo adimensional (Da direita para esquerda : $t=15$, $t=45$ e $t=75$).

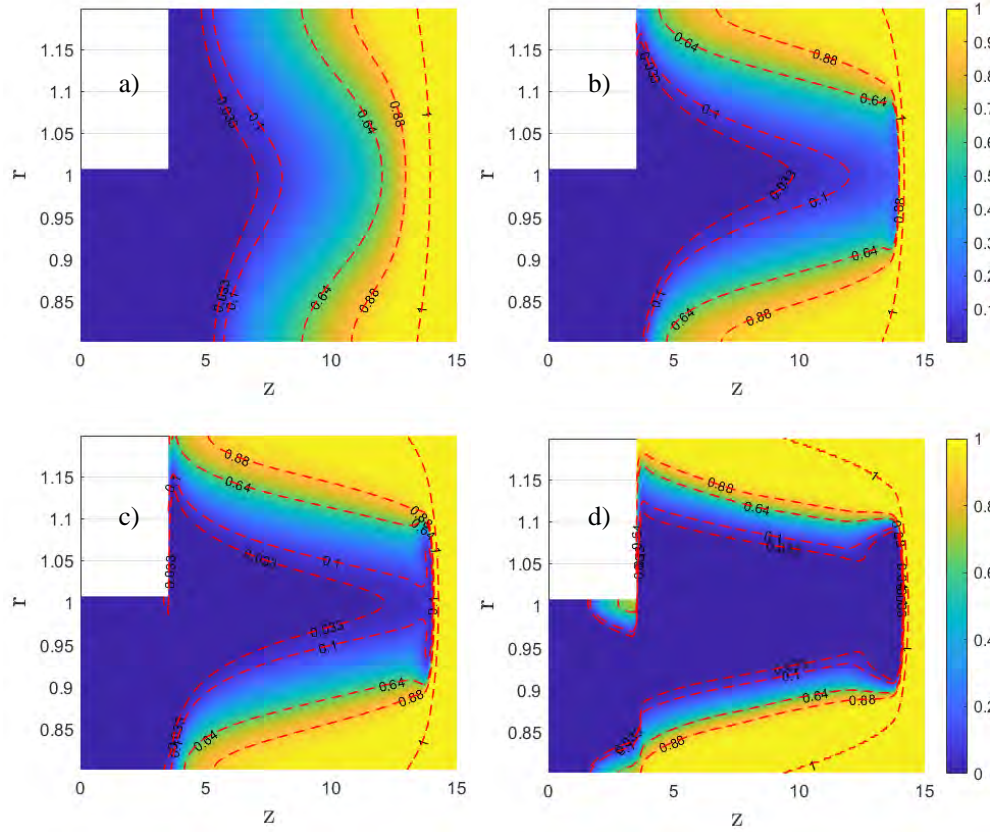


Figura 3.20: Ampliação dos gráficos das frentes de propagação da concentração para o instante $t=15$: $Pe = 1000, 6000, 10000$ e 50000 , respectivamente a), b), c) e d). Deslocamentos com valores menores de Pe suavizam os perfis de concentração, favorecendo a obtenção de altas eficiências de deslocamento.

A observação da figura 3.19 mostra com clareza o domínio da advecção que ocorre na interface de concentração dos fluidos com propriedades fixas, à medida que se amplia o número de *Péclet*.

Os gráficos da figura 3.20, são ampliações dos gráficos da figura 3.19 a), d), g) e j), do instante $t = 15$, que figuram o momento em que o deslocamento passa pela expansão do *washout*. Esta ampliação dos gráficos das frentes de propagação para o instante $t = 15$ demonstram a formação de *bottle necks* na extremidade das interfaces da frente de concentração. (Figura 3.20). Deslocamentos com $Pe = 1000$ tem alta difusão. Isto suaviza os gradientes radiais de concentração, reduzindo as chances de formação de um filme fino do fluido residente. Esta influência da difusão parece ser fundamental para a obtenção das altas eficiências de deslocamento observadas no presente capítulo.

Também plotamos o gráfico da figura 3.21 para um $Pe = 10000$, no instante $t = 15$, correspondente a figura 3.20 c), para melhor observação do

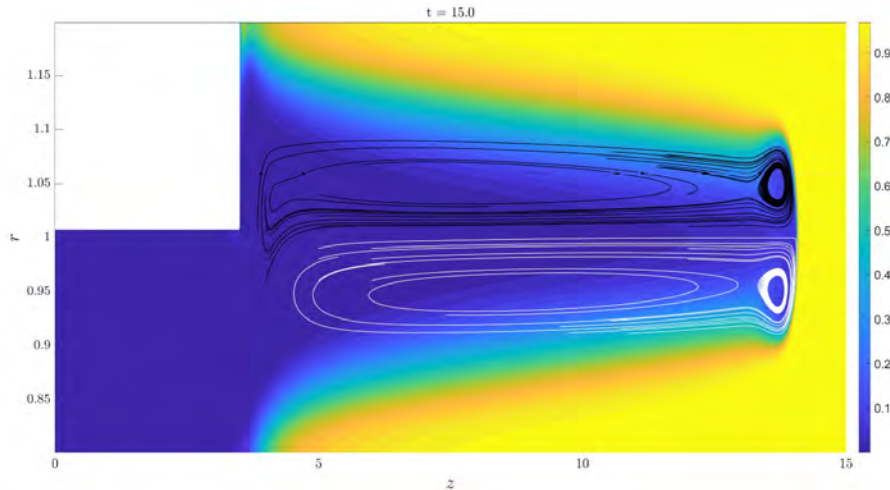


Figura 3.21: Simulação gráfica das linhas de corrente para $Pe = 10000$ em $t = 15$.

comportamento das linhas de corrente que se formam no interior do *bottle neck*. As linhas em preto representam a formação de linhas de corrente no sentido anti-horário, enquanto que as linhas em branco, mostram as linhas de corrente no sentido horário.

Para números de *Péclet* $Pe = 1000$ (figura 3.20 a)), os perfis das interfaces de mistura para as concentrações evidenciadas através das linhas vermelhas pontilhada (0.001, 0.01, 0.033, 0.1, 0.64, 0.88 e 1) adquirem um formato em *plug* e à medida que ampliamos o número de *Péclet*, a partir de 1000, para valores 6000, 10000 e 50000 (figuras 3.20 b) c) e d)), se prolongam com a redução dos comprimentos de mistura, condizente com uma diminuição dos efeitos difusivos.

Por outro lado, é possível concluir que, as forças viscosas se tornam dominantes para números de *Péclet* maiores e menos importante para número de *Péclet* menores (KUANG et al(2003) [39]), motivo pelo qual observamos um maior espalhamento do *Fluido 1* injetado, que perpassa pelos espaços preenchidos pelo *Fluido 2*, para os casos onde maiores números de *Péclet* são utilizados.

Um outro ponto observado é que, em nossos estudos, utilizamos um *Fluido 1* injetado, aproximadamente 7.3 vezes menos viscoso que o *Fluido 2* deslocado, o que intensifica uma interface mais instável do que o caso contrário, e potencializa os efeitos advectivos em relação aos difusivos. Desta forma, devido a uma difusão mais rápida, para menores números de *Péclet* (1.000, por exemplo), o fluido injetado levará um menor tempo para se misturar e preencher os espaços ocupados pelo fluido deslocado na região mais próxima

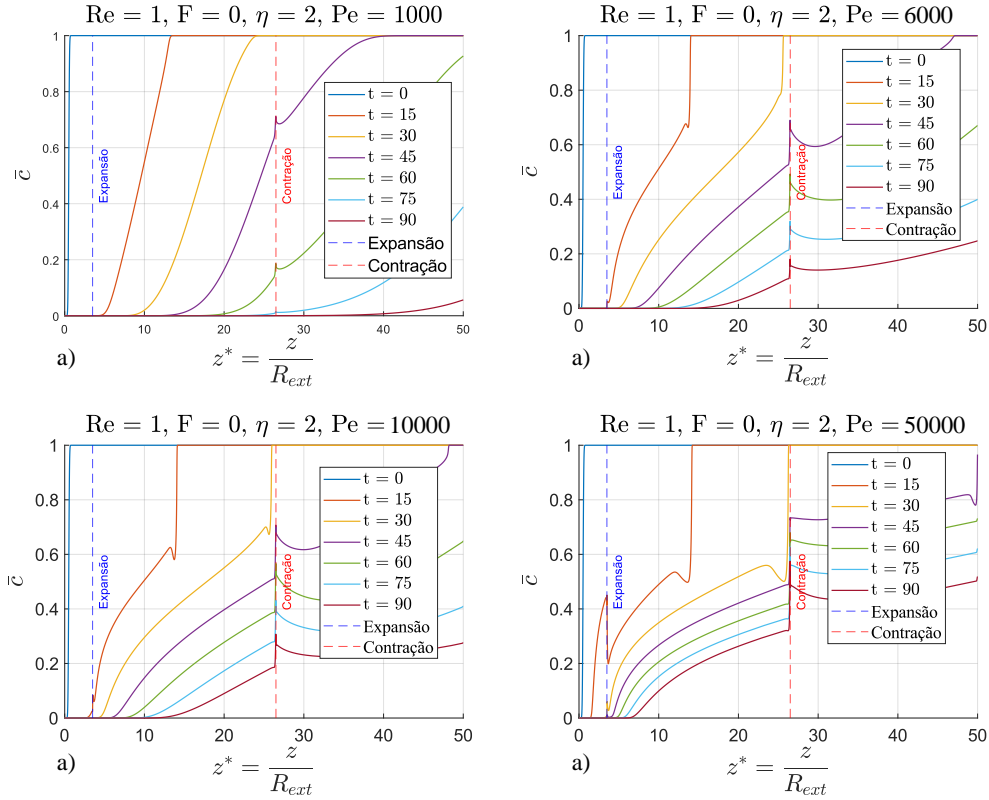


Figura 3.22: Curvas das concentrações médias do eixo radial r para diversos instantes de tempo, ao longo do eixo axial z , para números de *Péclet* (1000, 6000, 10000 e 50000, respectivamente, a), b), c) e d)).

à parede. Motivo pelo qual apresenta uma frente de concentração menos afunilada que os outros casos com Pe mais altos (6000, 10000 e 50000), devido à uma difusão mais lenta, porém ainda baixa devido à miscibilidade, gerando este tipo de perfil hidrodinâmico mais prolongado e afunilado (*bottle neck*).

Se dois fluidos são miscíveis, as tensões interfaciais entre eles vão tender à zero (Conforme observado por KUANG et al. [40]) e sua interface deverá ser definida por um gradiente de concentrações que será determinado pela relação entre advecção e a difusividade entre eles.

Complementando a figura 3.19, plotamos as curvas de concentrações médias em relação ao eixo radial r para diversos instantes de tempo (0, 15, 30, 45, 60, 75 e 90), figura 3.22 para mostrar a miscibilidade entre os dois fluidos.

Sobre a figura 3.22, A influência da geometria se torna evidente para maiores números de Pe . A passagem da interface difusa pela contração leva a um aumento significativo de \bar{c} para $Pe = 50000$. Isso indica que, uma redução na eficiência de deslocamento será observada. Em contrapartida, para o caso de deslocamentos com maior difusão, $Pe = 1000$, as curvas de \bar{c} percebem a influência da contração mas não alteram sua tendência de crescimento.

Adicionalmente, a partir da observação da figura 3.22, um baixo número de *Péclet* indica um domínio da difusão sobre a advecção, o que resulta em uma mistura mais lenta e, portanto, maior miscibilidade, observada através de maiores gradientes de concentração. Por outro lado, um alto número de *Péclet* implica em uma maior predominância do transporte convectivo sobre o difusivo, o que pode afetar a miscibilidade e gerar uma miscibilidade menor, ou um menor gradiente de concentração.

Conforme esperado, as curvas de concentração média indicam que a concentração média diminui conforme o escoamento progride ao longo do tempo.

Para números de *Péclet* maiores, as informações contidas nas curvas de concentração média complementam os gráficos que figuram as frentes de concentração (Figuras 3.19 e 3.20), que demonstram maiores concentrações médias à medida que aumentamos o número de *Péclet*, indicando uma menor performance do deslocamento para números de *Péclet* maiores.

Outra constatação interessante é que o comprimento de mistura é reduzido à medida que o número de *Péclet* é ampliado. Este maior gradiente de concentração para números de *Péclet* maiores, para um mesmo instante de tempo, sugere que a prevalência de efeitos advectivos desfavorecem o deslocamento do *Fluido 2*, devido a criação de *bottle necks* gerados devido à menores efeitos difusivos para números de *Péclet* maiores.

A figura 3.23 produz importantes informações da relação entre a velocidade axial v_z , velocidade radial v_r e o número de *Péclet*. A velocidade radial v_r não apresenta mudanças significativas em sua ordem de grandeza para nenhum dos casos. Por outro lado é possível observar que a velocidade máxima no eixo axial v_z sofre um importante crescimento com o aumento do número de *Péclet*, independente de sua posição no eixo axial. O aumento da velocidade axial v_z para um mesmo instante de tempo, para números de *Péclet* maiores, é explicado através da própria equação correspondente ao número de *Péclet*. Fisicamente, o afunilamento dos perfis de propagação da concentração, conforme aumentamos o número de *Péclet*, é causado pela menor capacidade de mistura entre os fluidos que contrapõe com o domínio dos efeitos advectivos, consequentemente gerando maiores velocidades axiais mais ao centro dos perfis de concentração.

Interessante observar que o escoamento sofre uma aceleração após sua passagem pela contração (figura 3.23 c), e) e g)), bastando uma comparação entre as velocidades axiais v_z nas posições, $z = 2$, $z = 30$ e $z = 40$ (Antes e após a erosão), e $z = 5$ e $z = 25$ (No interior da erosão expandida), cujas seções transversais têm áreas idênticas.

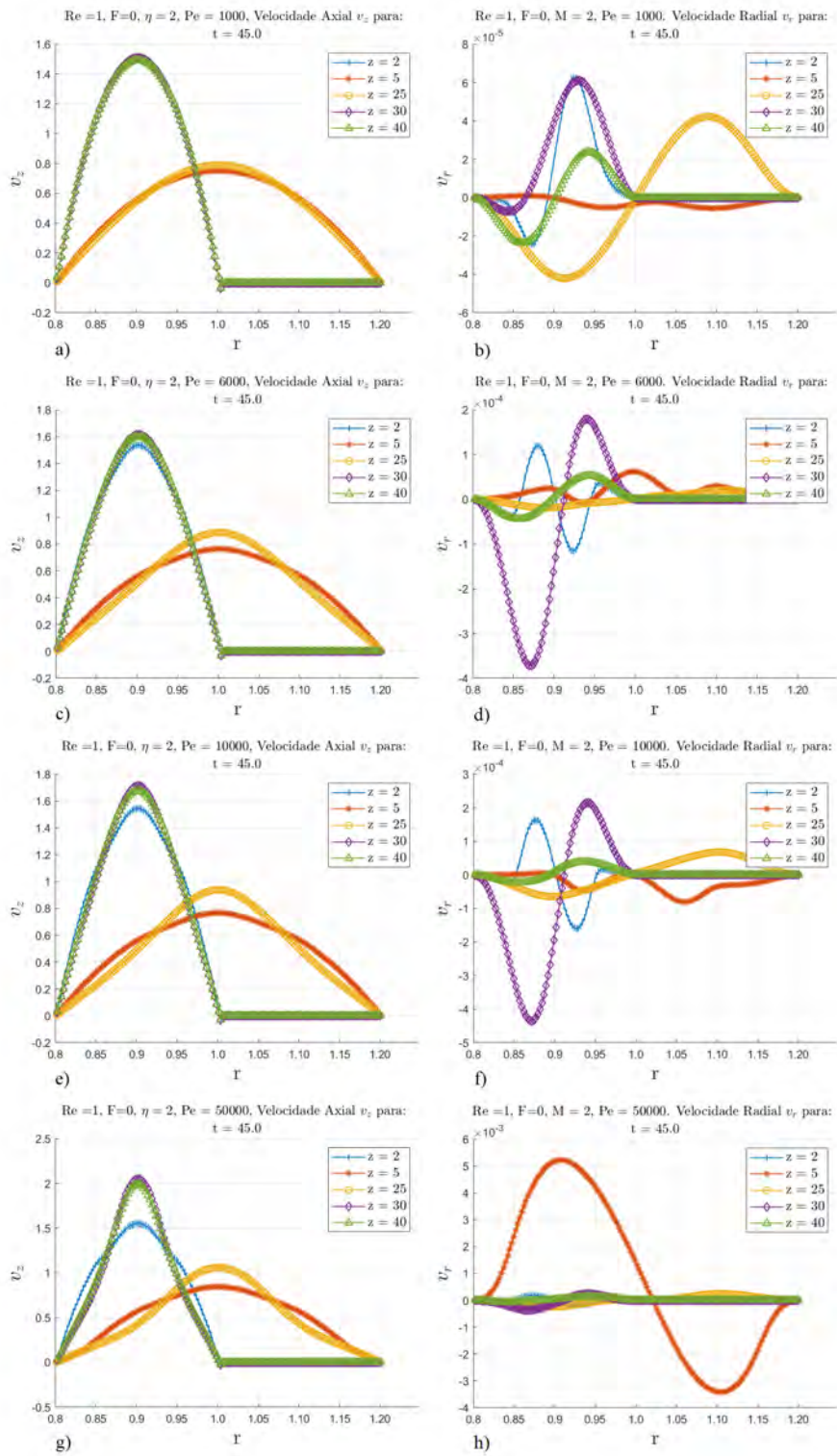


Figura 3.23: Perfis das velocidades axiais v_z , gráficos da esquerda, e velocidades radiais v_r , gráficos da direita, para diferentes números de Péclet (1000, 6000, 10000 e 50000, de cima para baixo), no instante $t = 45$ em diferentes posições ao longo do eixo axial z (2, 5, 25, 30 e 40).

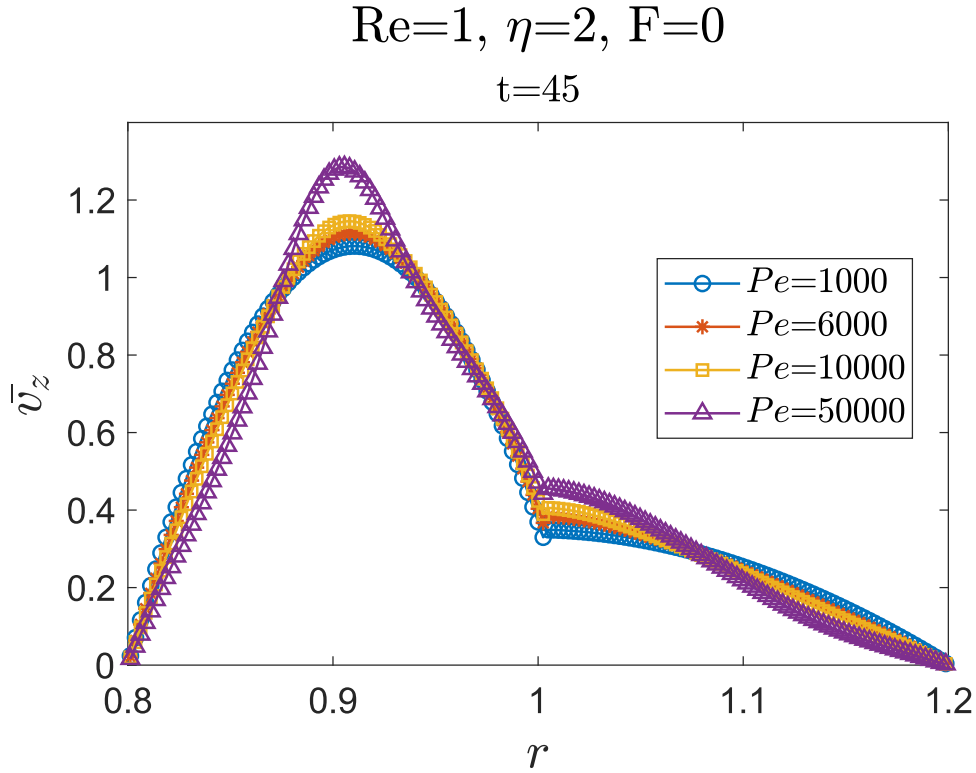


Figura 3.24: Velocidade média axial v_z no instante $t = 45$ para diversos números de *Péclet* (1000, 6000, 10000 e 50000). Uma fração menor da energia cinética adicionada ao sistema no processo de injeção é dissipada em processos difusivos à medida que aumentamos o número de *Péclet*. Isso justifica o fato de maiores velocidades serem observadas para maiores valores desse parâmetro.

As curvas de velocidades axiais médias \bar{v}_z da figura 3.24 demonstram de forma mais clara a relação entre a velocidade axial e o número de *Péclet*, confirmando os efeitos de afunilamento do perfil de propagação da concentração para maiores números de *Péclet*, ao observar o cruzamento e uma inflexão das curvas médias da velocidade axial, que se inicia a partir da posição radial da expansão, localizada em $r = 1$, gerando maiores velocidades médias axiais para número de *Péclets* menores, próximos à parede da expansão.

Devido à inexistência de uma interface bem definida entre os fluidos injetado e deslocado, a análise da eficiência deverá ser melhor demonstrada através do cálculo da concentração média global (\bar{c}) ao longo do tempo, conforme anteriormente analisado para o caso da análise da influência do número de *Reynolds*.

A figura 3.25 mostra esta eficiência do deslocamento em termos de uma concentração média global em relação aos eixos radial e axial, respectivamente r e z , ao longo do tempo.

As eficiências seguem praticamente idênticas até o instante $t = 45$. A

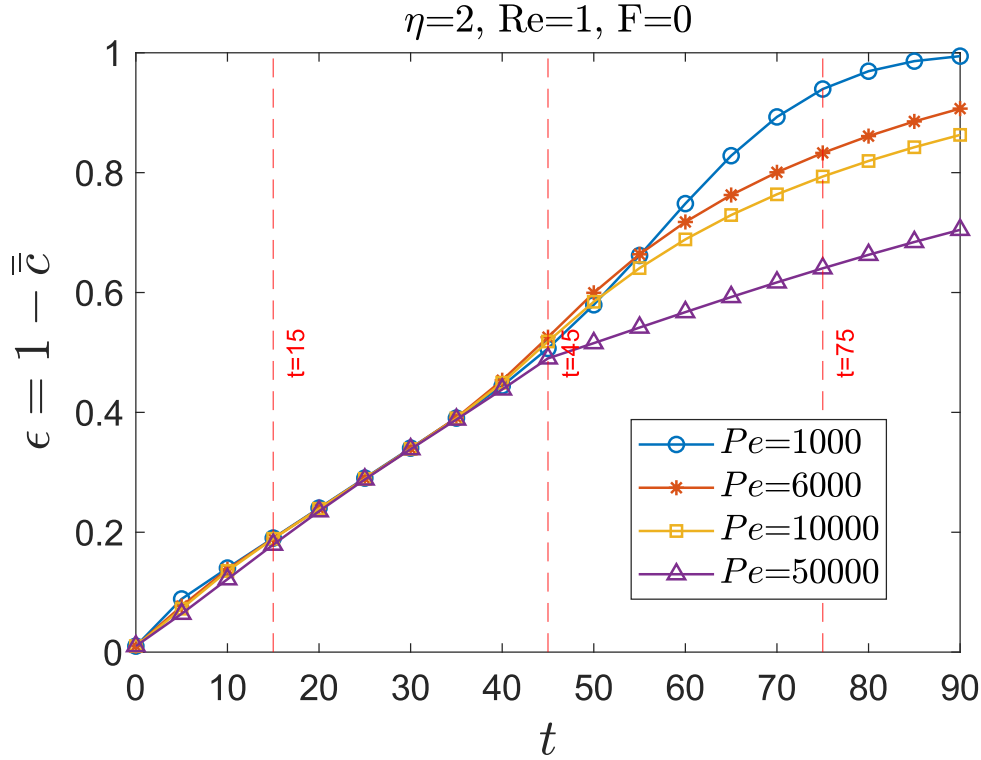


Figura 3.25: Eficiência do deslocamento ϵ , calculado a partir da média da concentração em relação aos eixos radial e axial (r e z respectivamente) para diversos números de *Péclet* (1000, 6000, 10000 e 50000) no intervalo de tempo $0 \leq t \leq 90$. Conforme evidenciada pelas figuras 3.20 e 3.22, a presença de alta difusão na interface entre os fluidos favorece a obtenção de altas eficiências de deslocamento.

partir deste instante, os escoamentos determinados por números de *Péclet* mais altos (6000, 10000 e 50000), apresentam uma redução da eficiência de deslocamento em relação ao escoamento com *Péclet* $Pe = 1000$: Eficiências próximas de 100%, 90%, 76% e 70%, respectivamente para *Péclets* : 1000, 6000, 10000 e 50000).

Conforme observado pela figura 3.19 b), e), h) e k), o instante $t = 45$ configura a saída das interfaces de concentração entre os dois fluidos da seção contendo a contração do *washout*. A partir deste instante, momento pelo qual o deslocamento passa pela região contraída em $z = 26.5$, a região central do deslocamento, em relação ao eixo radial é acelerada, decorrente dos fenômenos de advecção dominantes, que não oferecem tempo suficiente para a ocorrência de uma maior mistura (difusão) entre os dois fluidos, com um maior gradiente de concentração, do centro do anular para as paredes. Neste sentido, a contração da erosão, em conjunto com os fenômenos advectivos e um menor efeito difusivo contribuem conjuntamente para a redução da eficiência

do deslocamento.

De forma intuitiva, devido a miscibilidade entre os fluidos, espera-se que, conforme o tempo do escoamento é prolongado, a eficiência de deslocamento tenderá para um valor igual à 100% para todos os quatro casos, números de *Péclet*, $Pe = 1000$, $Pe = 6000$, $Pe = 10000$ e $Pe = 50000$.

3.3.3

Efeitos Gravitacionais - Influência do Fator Gravitacional (Número de *Galilei*)

Durante a cimentação primária de um poço petrolífero, uma série de fluidos são injetados, tendo como um dos objetivos principais, demover por completo o fluido de perfuração remanescente do anular, entre revestimento e poço aberto. Esta sequência de fluidos, de uma forma geral, obedece uma determinada hierarquia, pelo qual o fluido injetado, idealmente, deve ter uma densidade maior que o fluido deslocado, de forma a minimizar ou evitar possíveis instabilidades hidrodinâmicas causadas por efeitos gravitacionais durante o deslocamento através da abertura anular.

De acordo com LAVROV et al. (2016) [3], a ordem hierárquica na reologia e densidades dos fluidos bombeados é vantajosa, quando observada sob o ponto de vista de um escoamento ascendente e no sentido de minimizar estas instabilidades. Por outro lado, esta hierarquia é desvantajosa no momento em que os fluidos são bombeados no sentido descendente, no interior do revestimento, uma vez que a sequência é inversa, daí a necessidade de utilização de *plugs* de cimentação para prevenir qualquer instabilidade hidrodinâmica ou contaminações durante o escoamento até o fundo do poço.

Dada a grande complexidade e variedade das condições de fundo de poço (geometria do anular, formação geológica, vazão de bombeio, temperatura, permeabilidade e etc), torna-se quase impossível definirmos uma lista de densidades de fluidos utilizados durante todo o processo de cimentação de forma representativa o bastante para cobrirmos todas as condições e aplicações possíveis. Contudo de uma forma geral, para poços convencionais, a densidade dos fluidos de perfuração utilizados estão em torno de 8.8 ppg ($1054 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$) a 9.2 ppg ($1102 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$), podendo chegar a valores tão alto quanto 17 ppg ($2037 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$).

As densidades encontradas em fluidos injetados (pasta de cimento ou espaçadores) irão variar a depender de suas funções e características, por isso projetaremos um valor fixo de densidade para o fluido injetado em 13 ppg ($1577 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$), conforme já anteriormente pré estipulado. Desta forma será possível modalizar o valor da variação entre densidades $\Delta\rho$ para valores acima e abaixo de zero. Valores de $\Delta\rho$ negativos indicarão a presença de um fluido

injetado mais pesado que o fluido deslocado, valores de $\Delta\rho$ positivos indicam a utilização de um fluido injetado mais leve que o fluido deslocado e finalmente, teremos uma condição de isodensidade entre os fluidos, quando $\Delta\rho$ é igual a zero.

Para a análise dos efeitos da densidade dos fluidos utilizados durante a fase de deslocamento, utilizaremos a variável: número de *Galilei* (F), que é uma grandeza adimensional que determina a importância relativa entre forças gravitacionais (Empuxo) e forças viscosas, portanto quantifica os efeitos gravitacionais em um escoamento, que em nosso caso, ocorre na direção vertical, no sentido ascendente, no anular entre revestimento e o poço aberto e através de uma irregularidade radial (*washout*) com uma geometria já previamente definida nas seções anteriores.

Para a análise isolada dos efeitos da densidade no deslocamento entre dois fluidos, utilizaremos os seguintes parâmetros pré-definidos e fixos:

- $Re = 1$
- $\eta = 2$
- $Pe = 1000$

Correspondentes às seguintes grandezas absolutas para os cálculos dos parâmetros adimensionais acima:

- $\mu_1 = 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (Viscosidade dinâmica do fluido injetado).
- $\mu_2 = 0.74 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (Viscosidade dinâmica do fluido deslocado).
- $\rho_1 = 1577 \text{ kg/m}^3$ (Densidade do fluido injetado)
- $R_{ext} = 4.25 \text{ pol}$ (Raio do poço aberto).
- $Q = 0.003 \text{ bpm}$ (Vazão de Injeção).
- $D = 9.83 \cdot 10^{-5} \text{ pol}^2/\text{s}$ (Difusividade de partículas).

Utilizando-se os seguintes valores absolutos para o cálculo dos fatores gravitacionais F:

- $\mu_1 = 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (Viscosidade dinâmica do fluido injetado).
- $\rho_1 = 1577 \text{ kg/m}^3$ (Densidade do fluido injetado)
- ρ_2 tal que $-1.54 \leq \Delta\rho \leq 1.54 \text{ kg/m}^3$
- $R_{ext} = 4.25 \text{ pol}$ (Diâmetro hidráulico).
- $Q = 0.003 \text{ bpm}$ (Vazão de Injeção).
- $g = 9.82 \text{ m/s}^2$ (Aceleração da gravidade).

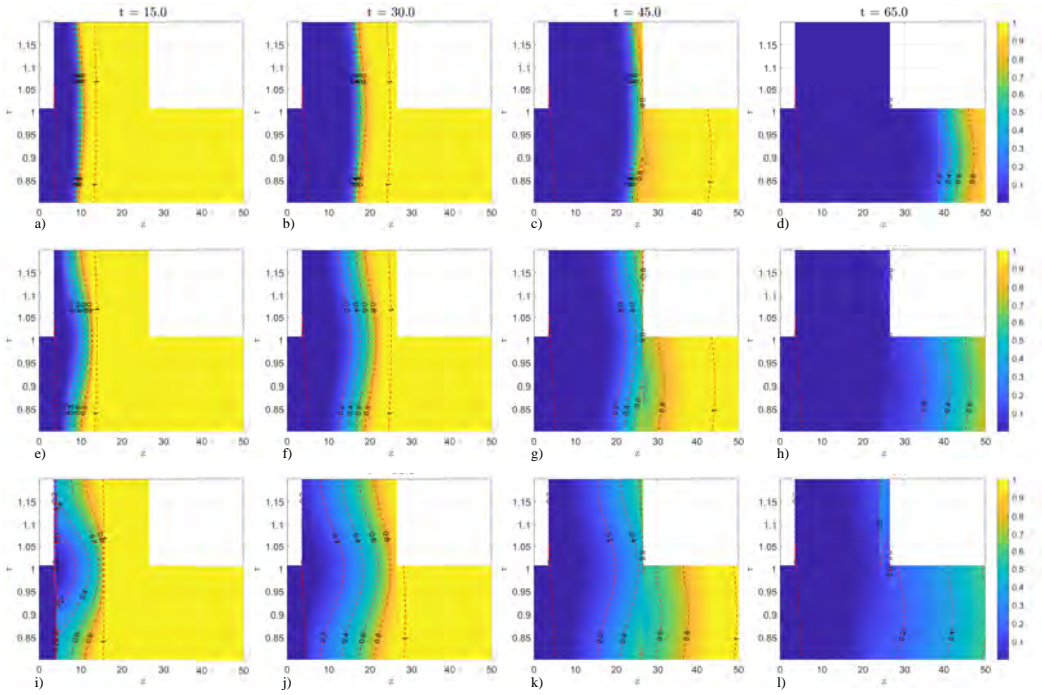


Figura 3.26: Simulação de perfis de propagação da concentração utilizando-se diversos parâmetros gravitacionais (De cima para baixo : -3000, 0 e 3000) para os instantes de tempo $t = 15, 30, 45$ e 65 . Da esquerda para direita. A injeção de um fluido mais denso ($F < 0$) em deslocamentos verticais ascendentes aumenta o gradiente de concentração na interface, reduzindo a mistura entre as fases.

Estamos interessados na interpretação dos efeitos do parâmetro gravitacional, determinado pela razão entre as forças gravitacionais e viscosas, no perfil de concentração e como a presença da irregularidade pode afetar a eficiência e a estabilidade do deslocamento.

As figuras 3.26 a), b) e c) demonstram que para valores negativos do número de *Galilei* $F = -3000$, a interface entre os fluidos obtém um formato de *plug*, confirmando que a utilização de fluidos injetados mais pesados favorecem o deslocamento durante escoamentos verticais ascendentes e minimiza possíveis instabilidades hidrodinâmicas. Por outro lado, para valores positivos de F , no caso $F = 3000$, a observação da figura 3.26 g), indica uma possível presença de instabilidade hidrodinâmica causada por efeitos gravitacionais, já no instante $t = 15$, no momento em que a frente de concentração entra na irregularidade em $z = 3.5$.

Uma outra constatação importante na mesma figura, é um aumento do comprimento de mistura e diminuição do gradiente de concentração, conforme se amplia o parâmetro F (-3000, 0 e 3000).

As figuras 3.26 de a) a i) indicam um aumento no comprimento da

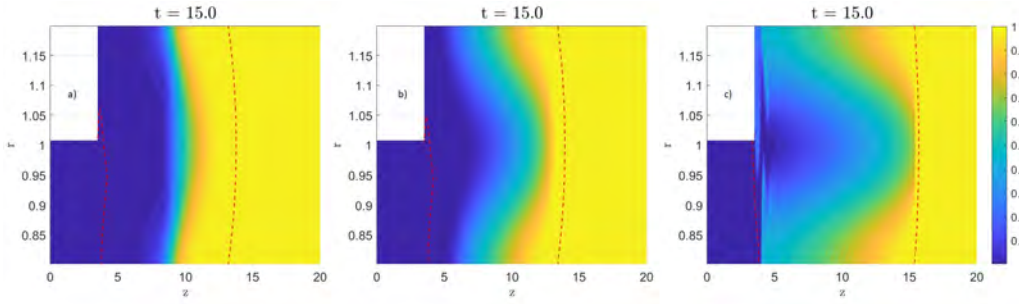


Figura 3.27: Ampliação do deslocamento, para $0 \leq z \leq 20$, da figura 3.26, no instante $t = 15$, para diversos parâmetros gravitacionais ($F = -3000$, 0 e 3000 , respectivamente a), b) e c)).

mistura através da comparação entre as distâncias das frentes de concentração para $c = 0.033$ e $c = 1$ (linhas pontilhadas em vermelho). Notar que, para um fator gravitacional $F = -3000$, a distância entre estas duas isolinhas de concentração ($c = 0.033$ e $c = 1$), é significativamente menor que no caso de um número de *Galilei* de $F = 3000$, indicando um maior gradiente de concentração.

O aumento do comprimento de mistura esta diretamente vinculado ao empuxo mais pronunciado do fluido injetado, permitindo que este fluido mais leve seja mais facilmente misturado com o fluido deslocado mais pesado. Esta é uma situação normalmente indesejável durante as operações de cimentação primária, com potencial de contaminação do fluido injetado pelo deslocado.

A figura 3.27 é uma ampliação da figura 3.26, no instante $t = 15$, instante aproximado pelo qual o deslocamento entra no *washout*. As linhas vermelhas delimitam as respectivas concentrações dos fluidos injetado $c = 0$ e deslocado $c = 1$, e demonstram com mais clareza a presença do início da instabilidade gravitacional para fluidos injetados mais leves ($F = 3000$), figura 3.27 c).

A instabilidade durante a entrada do deslocamento na irregularidade pode aumentar a formação de recirculações que potencializam uma maior mistura entre os dois fluidos, causando o aumento do comprimento de mistura para parâmetros gravitacional de *Galilei* positivos.

Para a análise dos efeitos da densidade durante o deslocamento entre dois fluidos miscíveis, plotamos os gráficos de concentração média \bar{c} em relação ao eixo radial r complementando o gráfico 3.26. A investigação das curvas confirma a localização das instabilidades, na entrada e saída do *washout*, para valores do parâmetro gravitacional de *Galilei* em $F = 3000$, contudo, não fornece informações suficientes sobre a eficiência do deslocamento.

A eficiência do deslocamento foi determinada através do cálculo da concentração média em função dos eixos axial e radial, para um instante de

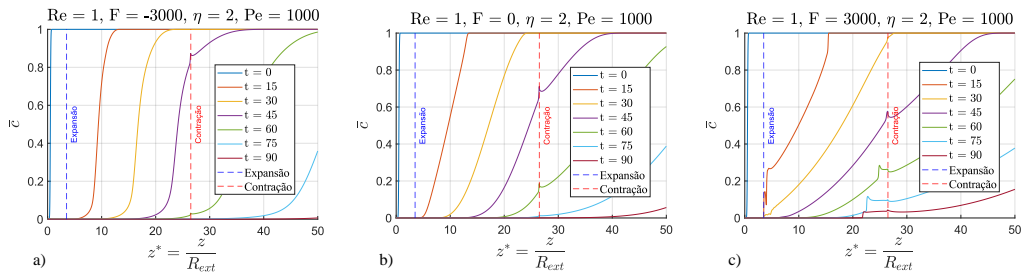


Figura 3.28: Concentração média \bar{c} em relação ao eixo radial r para valores de $F = -3000, 0$ e 3000 , respectivamente a), b) e c)

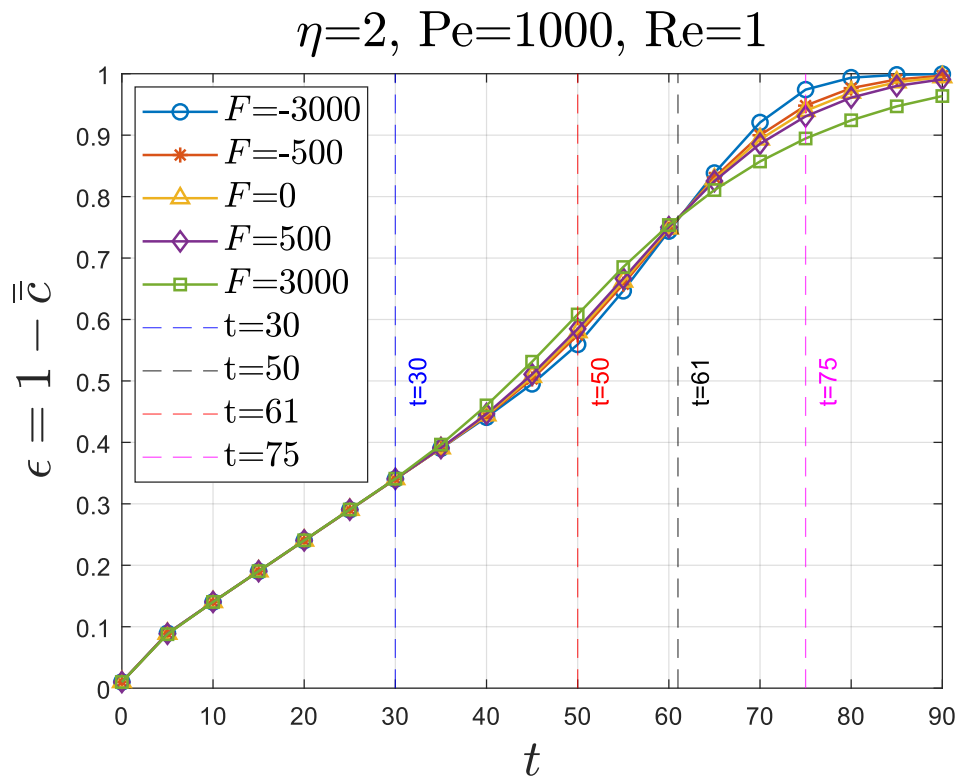


Figura 3.29: Eficiência do deslocamento ϵ , calculado a partir da média da concentração em relação aos eixos radial e axial (r e z respectivamente) para valores de $F = -3000, 0$ e 3000 em função do tempo $0 \leq t \leq 90$.

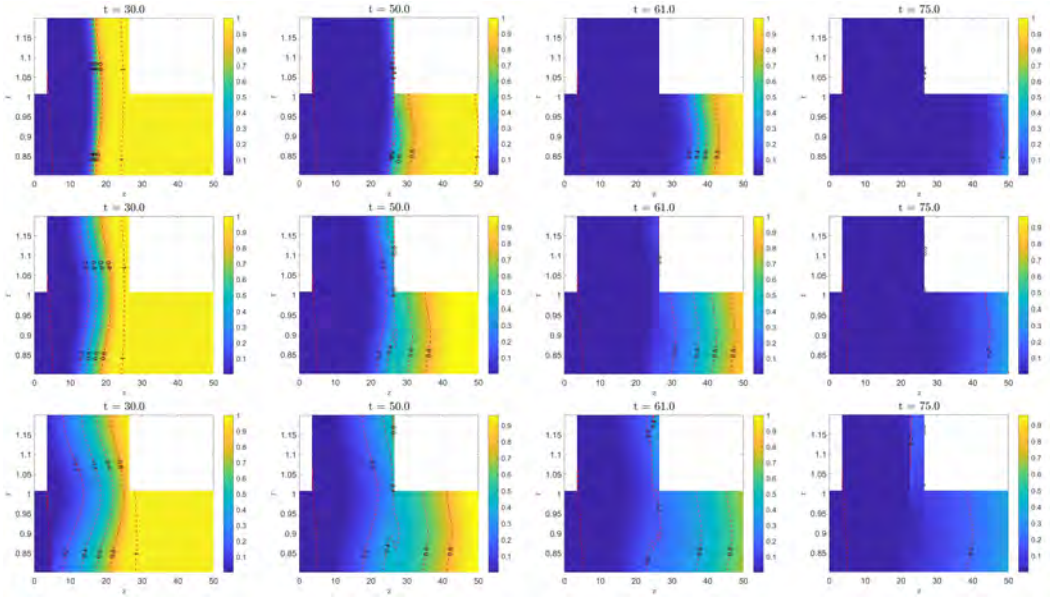


Figura 3.30: Perfil da propagação das concentrações para $c=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ e 1 , para diferentes parâmetros gravitacionais de *Galilei* (De cima para baixo, $-3000, 0$ e 3000) para os instantes $t=30, 50, 61$ e 75 (Da esquerda para direita), equivalentes a cada um dos instantes evidenciados pelas linhas vermelhas pontilhadas da figura 3.29

tempo máximo de escoamento $t = 90$. A figura 3.29 demonstra dois fenômenos distintos. A partir do instante $t = 30$, a eficiência do deslocamento cresce conforme aumentamos o valor de F ($-3000, -500, 0, 500$ e 3000). Por outro lado, o cenário se inverte, aproximadamente, a partir do instante $t = 61$, cuja eficiência do deslocamento diminui na proporção que o parâmetro gravitacional é ampliado. Ao final do instante $t = 90$, a eficiência do deslocamento para os parâmetros gravitacionais de *Galilei*, $F=-3000$, $F=-500$, $F=0$ e $F=500$, praticamente convergem para 100% de eficiência, ao passo que, para $F=3000$, a eficiência no mesmo instante se encontra em aproximadamente 95%.

Queremos analisar por que a eficiência do deslocamento é mais elevada para valores maiores do parâmetro gravitacional F , durante o intervalo $30 < t < 61$, e por qual motivo, a partir do intervalo $t > 61$, a eficiência do deslocamento aumenta para valores menores de F . Também observamos que, nos instantes, $t = 30$ e $t = 61$, as eficiências de deslocamento são praticamente iguais para qualquer seja o valor do parâmetro gravitacional de *Galilei* F .

Sob o ponto de vista físico, fluidos injetados com menor densidade que o deslocado (F maiores), resultam em forças gravitacionais que sobrepõem as forças viscosas, portanto os efeitos difusivos de transferência de massa vão dominar, gerando menores gradientes de concentração no escoamento.

Neste caso, frentes de concentração mais próximas de 1 serão deslocadas com mais facilidade e velocidade, após a expansão da irregularidade radial com maior área transversal, ou a partir de $z = 3.5$. Notar que este evento ocorre aproximadamente a partir do instante $t = 30$ (Primeira coluna da figura 3.30), momento pelo qual as isolinhas de concentração $c = 1$ se aproximam da contração da erosão expandida.

Conforme pode ser observado, na figura 3.30, no instante $t = 50$, as isolinhas próximas a $c = 1$ são deslocadas com maior velocidade para maiores valores de F (Visualizando-se as figuras no instante $t = 50$ de cima para baixo). Parâmetros gravitacionais mais elevados resultam em uma menor concentração de fluido deslocado (*Fluido 2* em amarelo), corroborando com a figura 3.29, que demonstra maiores valores de eficiência do deslocamento, a partir do instante $t = 30$, quanto maior for o parâmetro gravitacional.

Da mesma forma, à medida que as isolinhas com valores de concentração próximos ao fluido injetado, $c = 0$, se aproximam da contração da irregularidade, localizada em $z = 26.5$; como menores valores do parâmetro gravitacional de *Galilei* F resultam em um menor domínio dos efeitos gravitacionais e portanto um maior gradiente de concentração, a diminuição da área da seção transversal acelera o escoamento do fluido com concentrações mais próximas do fluido injetado $c = 0$, permitindo que o fluido injetado (*Fluido 1* em azul) continue a ocupar os espaços preenchidos pelo fluido a ser deslocado (*Fluido 2* em amarelo) mais rapidamente, desta forma obtém-se valores mais elevados da eficiência de deslocamento para valores menores de F . Este fato ocorre aproximadamente a partir do instante $t = 61$, conforme observação qualitativa da figura 3.30 e fundamentada pela figura 3.29.

A ocorrência de instabilidade gravitacional, para valores muito altos de F , tem o potencial de causar efeitos ainda mais indesejáveis para a eficiência do deslocamento devido a formação de recirculação de fluido localizado na porção superior da saída da irregularidade. Velocidades axiais v_z negativas foram observadas para valores de $F = 3000$ com possível formação de recirculação e potencial retardo no avanço do fluido injetado, conforme figura 3.31 b) e c).

Utilizamos diferentes valores de diferenciais de densidade $\Delta\rho$, através de um intervalo de: $-1.54 \leq \Delta\rho \leq 1.54$, correspondentes ao intervalo de fatores gravitacionais estudados de: $-3000 \leq F \leq 3000$.

Verificamos que, mesmo utilizando diferenciais de densidades muito baixos, os efeitos hidrodinâmicos são significativamente distintos um do outro, figuras 3.26 e 3.27. Mostrando também que a eficiência do deslocamento é fortemente influenciada por valores de diferenciais de densidades muito pequenos, figura 3.29.

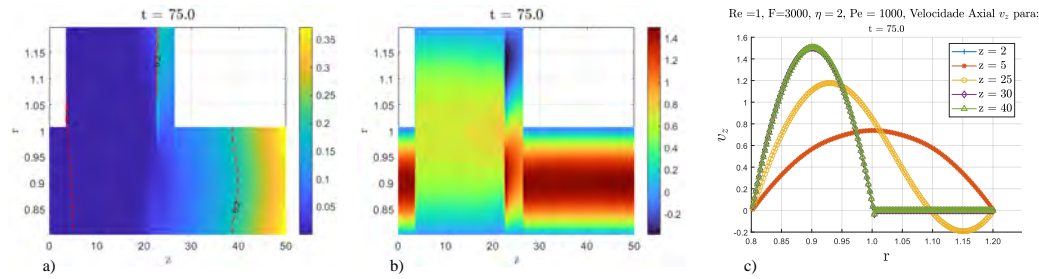


Figura 3.31: Simulações utilizando um fator gravitacional de *Galilei* $F = 3000$ no instante $t = 75$. a) Perfil de concentração, b) Campo de velocidade com o desmembramento da velocidade axial v_z e c) Perfis da velocidade axial v_z para diversos pontos ao longo do eixo axial z .

Da mesma forma, Etrati et al. (2020) [25] concluíram que mesmo pequenas diferenças de densidades entre os fluidos podem resultar em melhorias significativas para o deslocamento e remoção do fluido deslocado.

3.3.4

Efeitos da Viscosidade - Razão entre Viscosidades

De maneira simplificada, viscosidade é uma propriedade física que determina a resistência oferecida por um fluido em escoar. Portanto, intuitivamente, e em aplicações de cimentação primária, é possível afirmar que desejamos que a viscosidade do fluido a ser deslocado seja caracterizado por viscosidades mais baixas possíveis.

A literatura científica que pesquisa o processo de deslocamento multifásico aplicado à cimentação primária de poços, demonstra que a utilização de uma hierarquia entre viscosidades é geralmente benéfica para estas operações.

Dentre estes estudos podemos destacar PARVINDER et al. (2017) [8], concluindo que de forma ideal, a reologia do espaçador deverá ser maior que do fluido de perfuração e menor que a da pasta de cimento na temperatura de circulação do fundo do poço, para evitar a contaminação de fluidos. Portanto, para uma melhor eficiência de remoção do fluido de perfuração, a reologia deste sistema de fluido deve ser reduzida antes da operação de cimentação, sendo necessário a sintonização da reologia do espaçador utilizando-se da mesma hierarquia entre fluidos.

Mantendo-se todas as outras propriedades e parâmetros constantes, dentro de um regime laminar, o deslocamento de um fluido menos espesso através de um fluido injetado mais viscoso, geralmente, será mais eficiente do que a situação inversa. O contrário também é possível, caso a intenção seja limpar bolsões de fluido de perfuração desidratado ou gelificado das

irregularidades da seção transversal do poço por meio de um bombeio em fluxo turbulento. Esta seria uma situação excepcional e geralmente utilizada em pré-circulações, uma vez que, regimes de fluxos turbulentos com um fluido injetado com reologia superior (exemplo: viscosidade mais alta) poderia eventualmente violar os limites de pressão de perda de circulação da formação e, desta forma, comprometer todo o trabalho de cimentação. LAVROV et al. (2016) [3].

Contudo, estas argumentações são, a princípio, qualitativas e não levam em consideração os efeitos combinados entre diferentes parâmetros hidrodinâmicos, propriedades reológicas e densidades entre os dois fluidos. Este problema, ainda hoje, está longe de ser totalmente compreendido devido a complexidade e a quantidade de variáveis envolvidas durante o processo.

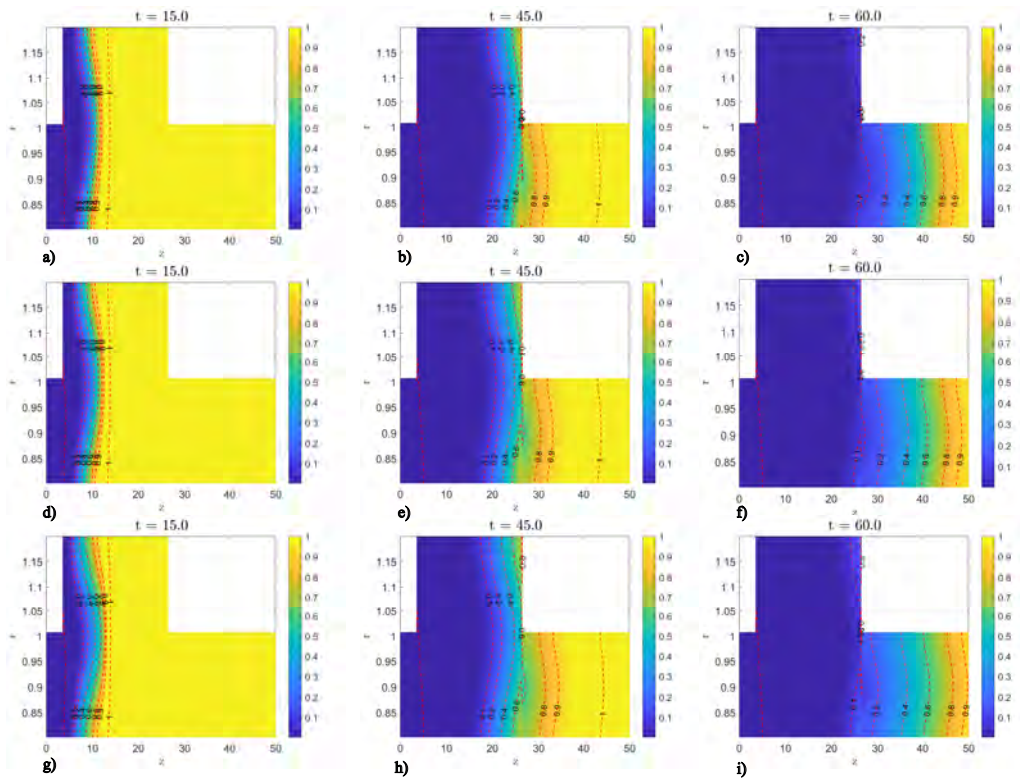


Figura 3.32: Simulações nos instantes $t = 15$, $t = 45$ e $t = 60$, da esquerda para direita, da propagação da concentração para diferentes razões entre viscosidades η (-2, 0, 2) de cima para baixo, figuras a), b), c), d) e f), g), h) e i) respectivamente.

Para a análise isolada do papel da viscosidade no comportamento hidrodinâmico do deslocamento, utilizamos um parâmetro adimensional determinado pela razão entre viscosidades entre fluido injetado e o fluido deslocado, conforme anteriormente exposto, através das equações: (2-11) e (2-12).

Para as simulações numéricas utilizaremos os seguintes parâmetros adimensionais fixos:

- $Re = 1$
- $F = 0$
- $Pe = 1000$

Que correspondem às grandezas absolutas abaixo, utilizadas como referência para caracterizar os fluidos relacionados com o problema do deslocamento:

- $\mu_1 = 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (Viscosidade dinâmica do fluido injetado).
- $\rho_1 = \rho_2 = 1577 \text{ kg/m}^3$ (Deslocamento isodenso)
- $R_{ext} = 4.25 \text{ pol}$ (Raio externo).
- $Q = 0.003 \text{ bpm}$ (Vazão de Injeção).
- $D = 9.83 \cdot 10^{-5} \text{ pol}^2/\text{s}$ (Difusividade de partículas).

Os valores de viscosidade do fluido deslocado para cada uma das razões entre viscosidades calculadas seguem abaixo :

- | | | |
|-----------------|-----------|--|
| • $\eta = -2$ | \mapsto | $\mu_2 = 0.0135 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ |
| • $\eta = -1$ | \mapsto | $\mu_2 = 0.0368 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ |
| • $\eta = -0.5$ | \mapsto | $\mu_2 = 0.0606 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ |
| • $\eta = 0$ | \mapsto | $\mu_2 = 0.1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ |
| • $\eta = 1$ | \mapsto | $\mu_2 = 0.2700 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ |
| • $\eta = 2$ | \mapsto | $\mu_2 = 0.7400 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ |

As razões entre viscosidades η do estudo variam entre -2 e 2. O objetivo de estudarmos esta amplitude de casos é, sobretudo, a inclusão de um número de contrastes de viscosidades suficientemente grande de forma a abranger a maioria das aplicações, bem como conhecer os limites do código numérico.

Seguindo a hierarquia reológica proposta pela indústria e literatura, normalmente, o *design* do fluido injetado é projetado de forma a ser 10 a 15 % mais viscoso que o fluido deslocado. Fluidos pelos quais, subsequente a um processo de condicionamento adequado, podem apresentar viscosidades dinâmicas na ordem de 5 a 30 cp (0.005 a 0.030 $\text{Pa} \cdot \text{s}$).

Realizamos simulações numéricas para diferentes razões entre viscosidades η , (-2,-1,-0.5, 0, 1 e 2). Entretanto, devido as semelhanças entre os gráficos,

limitamos a demonstração dos perfis de concentração para razões entre concentrações η em -2, 0 e 2, conforme figura 3.32. Valores negativos de η denotam um fluido injetado com viscosidade maior que o fluido deslocado, gerando um maior gradiente de concentração no perfil de concentração, ao passo que, valores positivos de η configuram a utilização de um fluido injetado menos viscoso que o fluido de perfuração e apresentam um menor gradiente de concentração. Estas diferenças de gradiente, apesar de pequenas, podem ser observadas nos gráficos da figura 3.32.

Ao menos dentro da faixa de valores de razões entre viscosidades utilizados em nossas simulações, o uso de diferentes razões entre viscosidades, não influenciou significativamente na dinâmica dos perfis das frentes de propagação de concentrações. Entretanto, uma observação mais detalhada dos diferentes perfis das isolinhas de concentração c destacados (0.2, 0.4, 0.6, 0.8), para as diferentes razões entre viscosidade η , demonstra a formação de um maior gradiente de concentração para menores valores de η , figura 3.32. Veremos a seguir, que estas diferenças no gradiente de concentração da mistura entre as razões de viscosidades consideradas nas simulações, não geram efeitos substanciais na eficiência do deslocamento.

Os gráficos da figura 3.33 complementam os da figura 3.32, através da observação do comportamento das curvas de concentração média \bar{c} em relação ao tempo t , considerando uma exposição do deslocamento a um tempo mais prolongado, para um instante final em $t = 90$.

A proximidade entre as curvas da concentração média \bar{c} , para cada instante de tempo simulado, das figuras 3.33 a), b) e c), constata que o *washout* tem efeitos pouco significativos na concentração média \bar{c} . Contudo, os gráficos das figuras 3.33 b) e c) indicam que, a concentração média \bar{c} é maior, para valores positivos de η , antes do estrangulamento, na saída do *washout* e torna-se menor, a medida que transcorre o tempo de deslocamento, após o estrangulamento do *washout* (na figura 3.33, indicada pelas linhas vermelhas pontilhadas, para cada instante de tempo considerado).

Contudo, a observação dos gráficos da figura 3.33 não é suficiente para analisar, por completo, os efeitos causados pela geometria do anular e pelas diferenças entre viscosidades dos fluidos injetado e deslocado.

A abordagem através da análise da eficiência do deslocamento ϵ é novamente utilizada e demonstra que, de fato, a eficiência do deslocamento é pouco influenciada pela viscosidade, entretanto, um pequeno incremento da eficiência do deslocamento pode ser observada, quando fluidos injetados mais viscosos são utilizados para deslocar fluidos menos viscosos. Figura 3.34. A miscibilidade entre os fluidos tem um papel significativo na convergência das

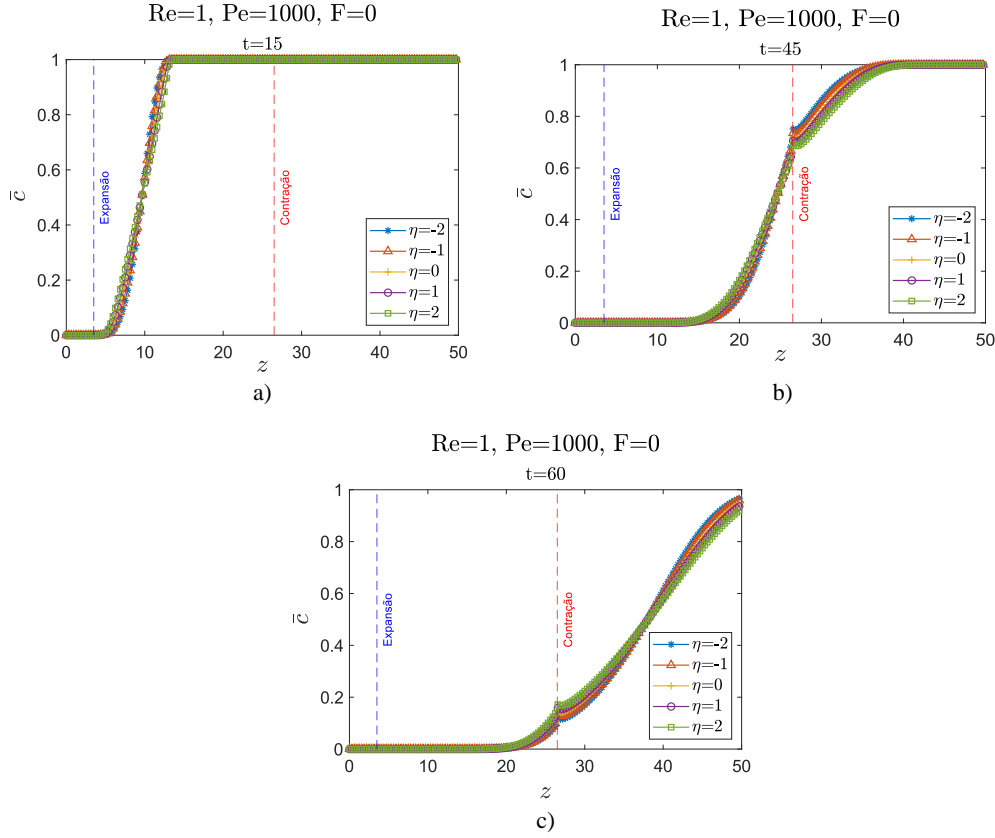


Figura 3.33: Curvas da concentração média em relação ao eixo radial r , em função do eixo axial z , no sentido do deslocamento, para diferentes instantes de tempo (15, 45 e 60), figuras a), b) e c), respectivamente.

eficiências de deslocamento próximos à valores de 100%.

Da mesma forma, ETRATI et al. (2020) [25] realizaram diversas simulações, com diferentes geometrias e relações entre viscosidades, concluindo que a mudança da relação entre viscosidades tem um efeito secundário para a eficiência do deslocamento através de um *washout*.

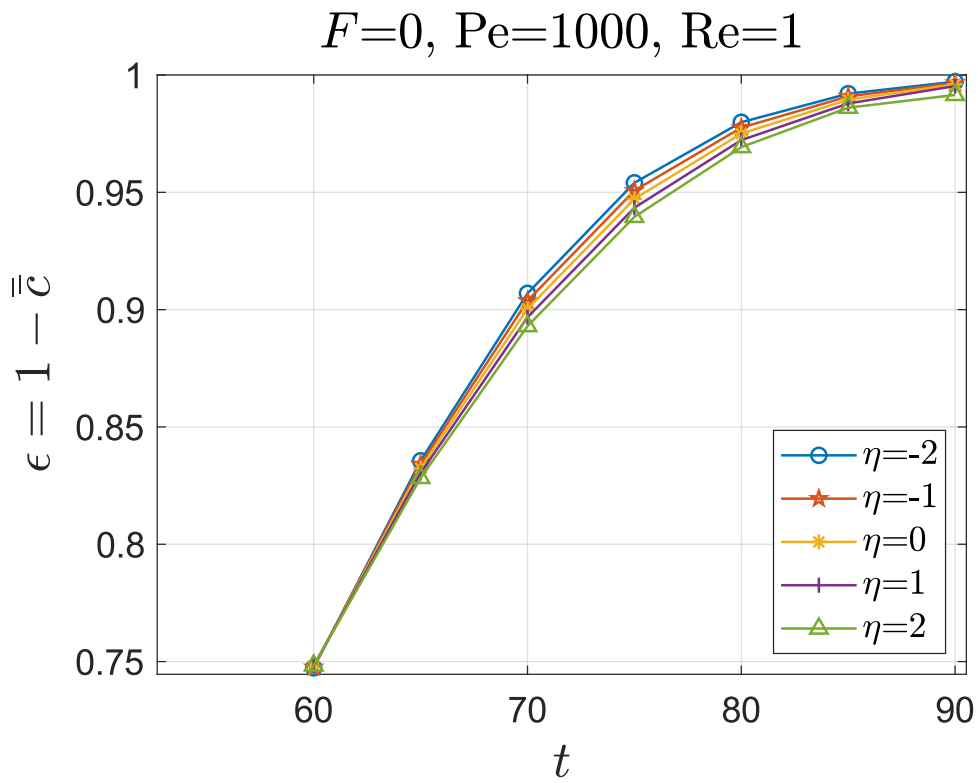


Figura 3.34: Curvas da eficiência do deslocamento ϵ a partir da média da concentração calculada em relação aos eixos radial r e axial z em função do tempo, no intervalo $60 \leq t \leq 90$ para diversos valores de razão entre viscosidades η .

4

Conclusão e Trabalhos Futuros

Nosso estudo é motivado por um problema da indústria de construção de poços de óleo e gás e é uma idealização da situação operacional de um poço vertical durante uma operação de cimentação primária que simula os efeitos hidrodinâmicos durante o deslocamento de dois fluidos com propriedades distintas atravessando uma irregularidade do poço aberto, *washout*.

A dissertação destaca a influência de processos difusivos em processos de deslocamento verticais entre fluidos newtonianos miscíveis confinados numa geometria anular que contém uma irregularidade (*washout*) retangular, utilizando um simulador numérico DNS (*Direct Numerical Simulation*) já pre-existente. A abordagem numérica do presente trabalho utiliza um código já previamente desenvolvido na linguagem C, pelo qual resolve as equações de *Navier-Stokes* com viscosidade variável em coordenadas cilíndricas acopladas a equação advectivo-difusiva da concentração, pelo qual, o campo de concentração promove um rastreamento de cada um dos fluidos identificando a interface difusa entre eles.

Os cálculos das eficiências do deslocamento, para cada um dos parâmetros adimensionais: número de *Reynolds* (Re), número de Péclet (Pe), parâmetro gravitacional de *Galilei* (F) e razão entre viscosidades (η), são feitos através do cálculo da concentração média global em relação às direções axial e radial. O campo de concentração é utilizado para identificar cada uma das fases e a interface difusa entre elas. Assim, valores médios desse parâmetro indicam a proporção dos fluidos injetado e residente que se encontram no domínio e são usados para calcular a eficiência de deslocamento.

Estudamos o deslocamento de diversos pares de fluidos miscíveis com propriedades distintas sujeitos à diferentes parâmetros hidrodinâmicos, utilizando uma metodologia pelo qual cada parâmetro adimensional, número de *Reynolds* (Re), razão entre viscosidades (η), fator gravitacional ou número de *Galilei* (F) e o número de *Péclet* (Pe), foram examinados isoladamente.

Dentro da faixa de diferenças de densidades $\Delta\rho$ e intervalos de tempo analisados, o aumento da diferença entre as densidades dos fluidos injetado e deslocado influencia de forma considerável os efeitos hidrodinâmicos do deslocamento, reduzindo o gradiente de concentração de forma considerável,

ajudando a manter uma separação entre as fases, mesmo utilizando $\Delta\rho$ na ordem de 1.54kg/m^3 . No entanto, diferentes valores de F têm pouca influência na eficiência para deslocamentos com alta difusão ($Pe = 1000$). A análise de diferentes densidades entre os fluidos ressaltam a importância de utilizar uma estratégia através do estabelecimento de uma hierarquia de densidades dos pares de fluidos como um dos meios de garantir um processo de deslocamento eficiente.

Para a faixa de diferentes viscosidades utilizadas nas simulações, a alteração da viscosidade do fluido deslocado gera um efeito mínimo no comportamento hidrodinâmico e eficiência do deslocamento.

Adicionalmente, nossas simulações demonstraram que a uso de regimes de bombeio distintos não causam impacto significativo na eficiência do deslocamento. Contudo foi observado que *Reynolds* muito altos potencializam a criação de zonas com velocidades axiais mais elevadas que podem trespassar os *washouts* e consequentemente gerar recirculações na área da entrada da irregularidade que podem causar a contaminação do fluido injetado. Os resultados demonstram também que, quanto mais elevado o número de *Reynolds*, maior será a instabilidade do deslocamento durante a entrada do *washout*.

A influência da miscibilidade entre as fases foi investigada através da utilização de diferentes coeficientes de difusividade para o cálculo de diversos números de *Péclet*. O estudo demonstra que o número de *Péclet* (Pe) gera efeitos hidrodinâmicos importantes durante o deslocamento de fluidos miscíveis, sobretudo na eficiência do deslocamento. Quanto maiores os efeitos difusivos (menores Pe), maior será a eficiência de deslocamento.

Deslocamentos com $Pe = 1000$, menor valor investigado, suavizam os perfis cisalhantes de concentração de modo a reduzir seus gradientes radiais. Isso dificulta a formação de um filme fino do fluido residente durante o processo de deslocamento e favorece a obtenção de altas eficiências de deslocamento. Este fenômeno, quando ocorre, parece dominar a dinâmica. Desta forma, ao fixar $Pe = 1000$, a variação dos demais parâmetros (número de *Reynolds* (Re), razão entre viscosidades (η), número de *Galilei* (F) e a própria geometria do *washout*, resultou em um menor efeito na dinâmica, de modo que, altas eficiências de deslocamento foram observadas em todos os casos.

Durante as operações de cimentação primária de poços de petróleo, fluidos não-newtonianos são mais usualmente utilizados pois apresentam propriedades reológicas complexas que permitem que eles sejam utilizados para várias funções, incluindo a prevenção de desmoronamentos de paredes do poço, controle de pressão, entre outros. Os modelos comumente utilizados, tanto em modelagens numéricas ou experimentais, são os de *Ostwald de Waale*, *Herschell*

Buckley, Casson e *Robert-Stiff*, principalmente usados para a caracterização do fluido de perfuração [1]. Contudo, fluidos de perfuração newtonianos podem ser aplicados em certas condições, como em poços com baixa pressão ou onde a estabilidade do poço é menos crítica. Além disso, as altas eficiências de deslocamento obtidas nesta investigação com fluidos newtonianos miscíveis indicam que o uso desses fluidos podem trazer benefícios aos processos industriais. Esses resultados indicam também que a miscibilidade entre os fluidos é um parâmetro que precisa ser melhor investigado, podendo contribuir para um aumento na eficiência de deslocamento, quando fluidos não-newtonianos são considerados.

Os resultados mostram eficiências de deslocamento mais elevadas em decorrência da miscibilidade e a natureza newtoniana entre os pares de fluidos, que motivam o uso de sistemas de fluidos que se aproximam do comportamento newtoniano na tentativa de atenuar e controlar as propriedades de interface com o fluido deslocado. Desta forma, a modelagem das condições de deslocamento entre fluidos newtonianos miscíveis poderá contribuir para a fase de pré-planejamento da cimentação primária através da utilização de modelos computacionais, que simulem sistemas de fluidos que possibilitem maximizar a eficiência do deslocamento.

A expectativa futura é a expansão dos estudos e análises hidrodinâmicas através da introdução de fluidos não-newtonianos e seus efeitos na eficiência do deslocamento. Este trabalho manteve o enfoque, na maioria de seus resultados, para o caso de $Pe = 1000$, enfatizando a importância para a miscibilidade dos fluidos na obtenção de altas eficiências de deslocamento. Uma extensão natural inclui uma expansão desses resultados para maiores valores de Pe , analisando como interfaces pouco difusas e não difusas ($Pe \rightarrow \infty$) afetam a eficiência de deslocamento para diferentes vazões de injeção (Re), razões entre viscosidades (η), números de *Galilei* (F) e as dimensões e geometria do *washout*. Uma extensão importante desse trabalho também deve contemplar a influência da miscibilidade em deslocamentos envolvendo fluidos não-newtonianos.

5

Reconhecimentos

O autor expressa sua gratidão a Carlos Pessanha (CENPES/Petrobras) e Nezia de Rosso (UFPR) que ajudaram na construção desta dissertação de mestrado através da troca de informações técnicas e literatura especializada. Ao Professor Arthur Braga e Ronaldo Izetti, que possibilitaram iniciar meu mestrado na PUC-RIO e aos colegas Bruno Jorge e Anna Matos.

Referências bibliográficas

- [1] NELSON, E. B.. **Well Cementing**. Elsevier, Amsterdam, 2nd edition, 1990.
- [2] BITTLESTON, S. H.; FERGUSON, J.; FRIGAARD, I. A.. **Mud removal and cement placement during primary cementing of an oil well - laminar non-newtonian displacements in an eccentric annular hele-shaw cell**. Journal of Engineering Mathematics, 43:229–253, 2022.
- [3] LAVROV, A.; TORSÆTER, M.. **Physics and Mechanics of Primary Well Cementing**. Springer, Switzerland, 3rd edition, 2016.
- [4] MENDES, P.R.S.; NACCACHE, M. F.; VARGES, P. R. V.; MARCHE-SINI, F. H.. **Flow of viscoplastic liquids through axisymmetric expansions-contractions**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 142:207–217, 2007.
- [5] ROUSTAEI, A.; GOSSELIN A.; FRIGAARD, I.A.. **Residual drilling mud during conditioning of uneven boreholes in primary cementing. part 1 : Rheology and geometry effects in non-inertial flows**. Journal of Petroleum Science and Engineering, 220:87–98, 2015.
- [6] ROUSTAEI, A.; GOSSELIN A.; FRIGAARD, I.A.. **Residual drilling mud during conditioning of uneven boreholes in primary cementing. part 2 : Steady laminar inertial flows**. Journal of Petroleum Science and Engineering, 226:1–15, 2015.
- [7] NACCACHE, M. F.; PINTO, H. A> M.; ABDU, A.. **Flow displacement in eroded regions inside annular ducts**. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 40:420, 2018.
- [8] PARVINDER, S.; LAL, K.; RASTOGI, C.S.; M P SINHA OIL AND GAS CORPORATION LIMITED . **Successful implementation of improved rheological hierarchy of mud - spacer - cement for effective zonal isolation - a case study**. Society of Petroleum Engineers, SPE-185405-MS, 2017.
- [9] GRAHAM, H. L.. **Rheology balanced cementing improves primary success**. Oil and Gas Journal, p. 53–59, 1972.

- [10] JAMOT, A.. **Déplacement de la boue par le laitier de ciment dans l'espace annulaire tubage-paroi d'un puits.** Rev.Assn.Fr.Tech.Pet., 224:27–37, 1974.
- [11] RENPU, W.. **Production Casing and Cementing**, in **Advanced Well Completion Engineering**. Elsevier, Houston-Tx-USA, third edition edition, 2011.
- [12] GEFEI, L.. **Applied Well Cementing Engineering**. Pegasus Vertex, Houston-Tx-USA, first edition edition, 2021.
- [13] JUNIOR SOUSA, A. M.; MARTINELLI, A. E.; DANTAS, T.; SILVA, M. M. N.. **Formulação e caracterização de pasta para cimentação de poço onshore.** RUNPETRO, 2015.
- [14] SHAHRIAR, A.; NEHDI, M.. **Rheological properties of oil well cement slurries.** ICE - Institute of Civil Engineering, 165:25–44, 2012.
- [15] WAN, R.. **Advanced Well Completion Engineering**. Houston, 3rd edition, 2011.
- [16] MCLEAN, R. H.; MANRY, C. W.; WHITAKER, W. W.. **Displacement mechanics in primary cementing.** Journal of Petroleum Technology, SPE1488:251–260, 1967.
- [17] BIEZEN, E.; WERFF, N.; RAVI, K.. **Experimental and numerical study of drilling fluid removal from a horizontal wellbore.** Society of Petroleum Engineers, SPE62887, 2000.
- [18] SAVERY, M.; DARBE, R.; CHIN, W.. **Modelling fluid interfaces during cementing using a 3d mud displacement simulator.** OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, OTC185113, 2007.
- [19] OLIVEIRA, R. M.; MEIBURG, E.. **Miscible displacements in hele-shaw dells: Three-dimensional navier-stokes simulations.** J. Fluid Mech., 687:431–460, 2011.
- [20] OLIVEIRA, R. M.; MEIBURG, E.. **Saffman-taylor instability and the inner splitting mechanism.** Physical Review Letters, PRL 118, 124502, 2017.
- [21] JOHN, M. O.; OLIVEIRA, R. M.; HEUSSLER, F. H. C.; MEIBURG, E.. **Variable density and viscosity, miscible displacements in horizontal hele-shaw cells. part 2. nonlinear simulations.** J. Fluid Mech., 271:295–323, 2013.

- [22] HEUSSLER F. H. C.; OLIVEIRA, R. M.; JOHN M. O.; MEIBURG E.. **Three-dimensional navier-stokes simulations of buoyant, vertical miscible hele-shaw displacements.** J. Fluid Mech., 752:157–183, 2014.
- [23] OLIVEIRA, R. M.; MEIBURG E.. **Three-dimensional vorticity configurations in miscible hele-shaw displacements.** ELSEVIER B. V., p. 203–212, 2013.
- [24] RAI, M.M.; MOIN, P.. **Direct simulations of turbulent flow using finite-difference schemes.** Journal of Computational Physics, 96:15–53, 1991.
- [25] ETRATI, A.; ROUSTAEI, A.; FRIGAARD, I. A.. **Strategies for mud-removal from washouts during cementing of vertical surface casing.** Journal of Petroleum Science and Engineering, 195, 2020.
- [26] YTREHUS, J. D.; LUND, B.; TAGHIPOUR, A.; DIVYANKAR, S.; SAASEN, A.. **Experimental investigation of wellbore fluid displacement in concentric and eccentric annulus.** International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2017-62028, 2017.
- [27] RENTERIA, A.; MAKELI, A.; FRIGAARD, I.; LUND, B.; TAGHIPOUR, A.; YTREHUS, J.D.. **Displacement efficiency for primary cementing of washouts sections in highly deviated wells.** OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, SPE-191989-MS, 2018.
- [28] ZARE, M.; ROUSTAEI, A.; FRIGAARD, I. A.. **Buoyancy effects on micro-annulus formation: Density stable displacement of newtonian-bingham fluids.** Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 247:22–40, 2017.
- [29] ZHANG, Z.; HUANG, Z.; ZHOU, Y.; SHENG, M.; WU, B.. **Characteristic of spiral displacement process in primary cementing of vertical well washout.** Society of Petroleum Engineers, SPE212288, 2022.
- [30] RENTERIA, A.; MALEKI, A. ; FRIGAARD, I. A.; LUND, B.; TAGHIPOUR, A. YTREHUS, J. D.. **Effects of irregularity on displacement flows in primary cemeting of highly deviated wells.** Journal of Petroleum Science and Engineering, 172, 2019.
- [31] LEAL, G. L.. **Advanced Transport Phenomena.** Cambridge University Press, Cambridge, UK, 13 edition, 2003.
- [32] LANDAU, L. D.; LIFSHITZ, E. M.. **Fluid mechanics.** Institute of Physical Problems, USSR Academy of Sciences, 6, 1959.

- [33] MANICKAM, O.; HOMSY, G.M.. Fingering instabilities in vertical miscible displacement flows in porous media. *J. Fluid Mech*, 288:75–102, 1995.
- [34] ISLAM, M.N.; AZAIEZ, J.. New viscous fingering mechanisms at high viscosity ratio and péclet number miscible displacements. *J. Porous Media*, 10(4), 2007.
- [35] CHEN, C.Y.; MEIBURG, E.. Miscible displacements in capillary tubes. part 2. numerical simulations. *Phys. Rev. Lett.*, 118(12):124502, 2017.
- [36] TAN, C.T.; HOMSY, G. M. . Simulation of nonlinear viscous fingering in miscible displacement. *Phys. Fluids*, 31(6):1330–1338, 1988.
- [37] GOYAL, N.; MEIBURG, E.. Miscible displacements in hele-shaw cells : two-dimensional base states and their linear stability. *J. Fluid Mech.*, 558:329–355, 2005.
- [38] YORTSOS, Y. C.; ZEIBEK, M.. Dispersion driven instability in miscible displacement in porous media. *Phys. Fluids*, 31(12), 1988.
- [39] KUANG, J.; MAXWORTHY, T.; PETITJEANS, P.. Miscible displacements between silicone oils in capillary tubes. *European Journal of Mechanics B/ Fluids*, 22:271–277, 2003.
- [40] KUANG, J.; PETITJEANS, P.; MAXWORTHY, T.. Velocity fields and streamline patterns of miscible displacements in cylindrical tubes. *Experiments in Fluids*, 37:301–308, 2004.