



Aline Amaral Quintella Abdu

**Deslocamento de fluidos não newtonianos em
anulares**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Mecânica.

Orientador: Prof. Mônica Feijó Naccache

Rio de Janeiro
Outubro de 2016



Aline Amaral Quintella Abdu

**Deslocamento de fluidos não newtonianos em
anulares**

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

Prof. Mônica Feijó Naccache

Orientador

Departamento de Engenharia de Mecânica – PUC-Rio

Prof. Paulo Roberto de Souza Mendes

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dr. André Leibsohn Martins

CENPES – Petrobras

Prof. Roney Leon Thompson

Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 7 de Outubro de 2016

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

Aline Amaral Quintella Abdu

Mestrado e graduação em Engenharia Mecânica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Atua como pesquisadora no Grupo de Reologia da PUC-Rio (GReo)

Ficha Catalográfica

Abdu, Aline Amaral Quintella

Deslocamento de fluidos não newtonianos em anulares / Aline Amaral Quintella Abdu; orientador: Mônica Feijó Naccache. – Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia de Mecânica, 2016.

v., 111 f: il. ; 30 cm

1. Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia de Mecânica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia de Mecânica – Teses. 2. não newtoniano. 3. deslocamento de fluidos. 4. fluidos viscoplásticos. I. Naccache, Mônica Feijó. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia de Mecânica. III. Grau.

CDD: 621

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais, Tadeu e Heloiza, por investirem na minha educação e pelos valores passados. Tudo que conquistei só foi possível porque tenho vocês.

A minha orientadora, Mônica Feijó Naccache, por todo o conhecimento transmitido e por toda a paciência ao longo desses anos.

Ao Paulo Roberto de Souza Mendes, pela contribuição técnica no desenvolvimento do loop experimental.

A todos do Grupo de Reologia (GReo), Alexandra, Alexandre, Bruna, Bruno, Carina, Camila, Gisllane, Hannah, Priscilla e Ricardo por todo o apoio durante esses anos. Sem a ajuda de todos vocês esse trabalho não seria possível.

O que a vida nos reserva, o tempo dirá. Obrigada Luis Henrique, por todo apoio, carinho e atenção durante esse tempo juntos. Só tenho a agradecer por tudo.

Por fim, gostaria de agradecer ao CNPq pelo apoio financeiro e à PUC-Rio pela bolsa de isenção de mensalidades do doutorado.

Resumo

Abdu, Aline Amaral Quintella; Naccache, Mônica Feijó. **Deslocamento de fluidos não newtonianos em anulares**. Rio de Janeiro, 2016. 111p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia de Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Na indústria do petróleo são comuns processos envolvendo deslocamentos de um fluido pelo outro, como nos processos de completação e cimentação de poços. A eficiência desses deslocamentos é de suma importância, garantindo a vida útil do poço. A operação é considerada adequada quando ocorre uma distribuição homogênea da pasta de cimento na parede do poço. No presente trabalho um estudo experimental e numérico do deslocamento de fluidos em espaço anular foi realizada. Para os testes experimentais um simulador físico de um poço em escala foi construído. As equações de conservação de massa e momento foram resolvidas através do método de volumes finitos, utilizando os programas Fluent e OpenFOAM. Para a modelagem multifásica foi utilizado o método *volume-of-fluid* (VOF). No estudo, a avaliação da influência de parâmetros reológicos, razões de densidade e viscosidade, geometria do poço e vazão de bombeio foi realizada com o objetivo de otimizar o processo de cimentação. Os fluidos utilizados foram fluidos modelos e reais, newtonianos e não newtonianos. A eficiência de deslocamento foi avaliada através da configuração da interface entre os fluidos e através da determinação da densidade da mistura na saída do anular ao longo do tempo.

Palavras-chave

não newtoniano; deslocamento de fluidos; fluidos viscoplásticos;

Abstract

Abdu, Aline Amaral Quintella; Naccache, Mônica Feijó(Advisor).
Non-Newtonian fluid displacement in annuli. Rio de Janeiro,
2016. 111p. PhD Thesis – Departamento de Engenharia de
Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Displacement of one fluid by another is a common process at petroleum industry, as completion and cementing operations of oil wells. The success of these fluids displacement guarantee the lifetime of the wells. The adequate operation occurs when the cement slurry distribution at the wall is homogeneous. In this work, experimental and numerical studies of Newtonian and non-Newtonian fluid displacement through annuli are performed. The experiments are performed using a scaled oil well model. The numerical solution of the governing conservation equations of mass and momentum is obtained using the finite volume technique and Fluent and OpenFOAM softwares. The multiphase modeling is performed using the volume of fluid (VOF) method. The effect of rheological parameters, density and viscosity ratios, geometry configuration, and flow rate on displacement efficiency was evaluated to optimize cementing operation. Tests were performed using model and real fluids, Newtonian and non-Newtonian. The displacement efficiency was evaluated analyzing the interface between fluids and measuring the density of the mixture at the annuli outlet through time.

Keywords

non-Newtonian; fluid displacement; viscoplastic fluids;

Sumário

1	Introdução	21
1.1	Motivação	21
1.2	Revisão bibliográfica	22
2	Metodologia Experimental	30
2.1	Seção de Testes	30
2.2	Procedimento Experimental	33
2.3	Análise dos resultados	34
2.4	Fluidos de teste	35
3	Metodologia Numérica	37
3.1	Modelos constitutivos de viscosidade	37
3.2	Equações Governantes	38
3.3	Método dos Volumes Finitos	40
3.4	OpenFOAM	41
3.4.1	Modelos constitutivos de Viscosidade	42
3.4.2	Condições de Contorno	43
3.4.3	Esquemas numéricos	43
3.4.4	Solução e controle dos algoritmos	44
3.5	Teste de Malhas	45
3.6	Validação do procedimento numérico - OpenFOAM x Fluent x Experimento	45
3.7	Influência da tensão interfacial nos resultados	46
4	Resultados	48
4.1	Resultados Experimentais	49
4.1.1	Casos newtonianos: etilenoglicol deslocando água	49
4.2	Resultados Experimentais	50
4.2.1	Casos newtonianos: água deslocando óleo soya	50
4.2.2	Casos não newtonianos: propriedades dos fluidos deslocadores	51
4.2.3	Fluido pseudoplástico	52
4.2.4	Fluido Viscoplastico	60
4.2.5	Comparação fluido viscoplastico e fluido pseudoplástico deslocados pelas soluções de glicerina	64
4.2.6	Fluido Tixotrópico	64
4.3	Casos reais: Fluido de Perfuração 1 e Fluido de Perfuração 2	67
4.4	Resultados Numéricos	71
4.4.1	Fluido pseudoplástico	71
4.4.2	Efeito da variação de densidades	76
4.4.3	Fluido viscoplastico	82
4.4.4	Dois fluidos viscoplasticos	92
5	Conclusão	100

Referências bibliográficas	105
A Procedimento de preparo dos fluidos	108
A.1 Preparo do Fluido Pseudoplástico	108
A.2 Preparo do Fluido Viscoplastico	109
A.3 Preparo do Fluido Tixotrópico	110

Lista de figuras

1.1	Exemplo de falha na cimentação (?)	22
1.2	Etapas do processo de cimentação.	24
2.1	Seção de testes (<i>Créditos foto: Alexandra Aliche</i>).	30
2.2	Exemplo com diferentes configurações de geometria.	31
2.3	Mecanismo de excentricidade e controle da inclinação.	32
2.4	Bomba de deslocamento positivo NETZSCH.	32
2.5	Detalhe da geometria do densitômetro.	32
2.6	Interface do software de aquisição ProLink III.	33
2.7	Esquema da geometria do experimento.	35
2.8	Eficiência de deslocamento.	35
3.1	Estudo numérico realizado em motores elétricos (ANSYS Solutions - Fall 2005).	40
3.2	Exemplo do arquivo <i>transportProperties</i> .	42
3.3	Arquivo <i>fvSchemes</i> .	44
3.4	Teste de malhas e domínio computacional 3D.	45
3.5	Etilenoglicol deslocando água para $Re=4$ e $Re=70$. Comparação experimental e numérica (ANSYS Fluent e OpenFOAM).	46
(a)	$Re=4$	46
(b)	$Re=70$	46
3.6	Teste tensão interfacial.	47
(a)	com tensão	47
(b)	sem tensão	47
4.1	Etilenoglicol deslocando água para $Re=4$ e $Re=70$. Comparação experimental e numérica.	50
(a)	$Re=4$	50
(b)	$Re=70$	50
4.2	Água deslocando óleo soya para $Re=532$ e $Re=1226$.	51
(a)	$Re=532$	51
(b)	$Re=1226$	51
4.3	<i>Flow curve</i> para goma xantana de 0.1% e 0.08%.	52
4.4	Escoamento da solução de glicerina 60% deslocando goma xantana 0.1% para $Re=49$.	54
(a)	experimental	54
(b)	numérico	54
4.5	Influência do número de Re - caso concêntrico vertical.	54
(a)	$\rho_r = 1.072$ para $\eta_r = 0.0973$ e 0.1448	54
(b)	$\rho_r = 1.164$ para $\eta_r = 0.5168$ e 0.7694	54
4.6	Influência do número de Re - caso excêntrico vertical.	55
(a)	$\rho_r = 1.072$ para $\eta_r = 0.0973$ e 0.1448	55
(b)	$\rho_r = 1.164$ para $\eta_r = 0.5168$ e 0.7694	55
4.7	Glicerina 60% deslocando GX 0.1% - $Re = 116$	56
(a)	Vertical	56

(b) Inclinado 45	56
4.8 Goma xantana 0.1% deslocando as duas concentrações de glicerina.	56
(a) $\rho_r = 0.933$ e $\eta_r = 6.9031$	56
(b) $\rho_r = 0.8594$ e $\eta_r = 1.2997$	56
4.9 Goma xantana 0.1% deslocando glicerina 60% - $Re=77$	57
4.10 Glicerina 30% deslocando goma xantana 0.08%.	57
(a) $Re=242$	57
(b) $Re=570$	57
4.11 Glicerina 60% deslocando goma xantana 0.08% - $Re=116$.	58
(a) Vertical	58
(b) Inclinado 45°	58
4.12 <i>Flow curve</i> para Carbopol® 0.1%.	60
4.13 Glicerina 30% deslocando Carbopol® 0.1% para anular vertical e inclinado 45°	62
(a) anular vertical	62
(b) anular inclinado	62
4.14 Glicerina 60% deslocando Carbopol® 0.1% para anular vertical e inclinado 45°	63
(a) anular vertical	63
(b) anular inclinado	63
4.15 Carbopol® 0.1% deslocando glicerina 30% para anular concêntrico e excêntrico verticais.	63
4.16 Comparação Carbopol® 0.1% e GX 0.1% deslocados por glicerina 60% para $Re=49$ e 116.	64
(a) $Re=49$	64
(b) $Re=116$	64
4.17 Curvas de tensão e viscosidade para taxas de deformações diferentes.	65
(a) Tensão	65
(b) Viscosidade	65
4.18 Deslocamento para tempos de espera iguais a 0 horas, 1 hora e 2 horas.	66
4.19 Glicerina 60% deslocando Laponita® 2% para $Re=49$.	66
(a) teste 1	66
(b) teste 2	66
4.20 Deslocamento para tempos de espera iguais a 0 horas, 0.5 horas 1 hora e 2 horas.	67
4.21 Glicerina 60% deslocando Laponita® 2% para $Re=116$.	67
(a) teste 1	67
(b) teste 2	67
4.22 Reologia dos fluido de perfuração 1 e 2.	68
4.23 N-parafina deslocando FP 1 em anular concêntrico para $Re=187$ e $Re=438$.	69
(a) concêntrico e vertical	69
(b) concêntrico e inclinado	69
4.24 N-parafina deslocando FP 1 em anular excêntrico para $Re=187$ e $Re=438$.	70
(a) excêntrico e vertical	70
(b) excêntrico e inclinado	70

4.25	N-parafina deslocando FP 2 em anular concêntrico para $Re=187$ e $Re=438$.	70
(a)	concêntrico e vertical	70
(b)	concêntrico e inclinado	70
4.26	N-parafina deslocando FP 2 em anular excêntrico para $Re=187$ e $Re=438$.	70
(a)	excêntrico e vertical	70
(b)	excêntrico e inclinado	70
4.27	Campos de fração volumétrica, taxa de deformação e velocidade em plano axial para $Re=242$.	72
(a)	fases	72
(b)	taxa de deformação	72
(c)	velocidade	72
4.28	Campos de fração volumétrica, taxa de deformação e velocidade em plano axial para $Re=49$.	72
(a)	fases	72
(b)	taxa de deformação	72
(c)	velocidade	72
4.29	Campos de fração volumétrica, taxa de deformação e velocidade em plano axial para $Re=116$.	72
(a)	fases	72
(b)	taxa de deformação	72
(c)	velocidade	72
4.30	Campos de fração volumétrica, taxa de deformação e velocidade em planos transversais para $Re=116$.	73
(a)	fases	73
(b)	taxa de deformação	73
(c)	velocidade	73
4.31	Campos numéricos no plano $z=0.23$ m para $Re=116$.	73
(a)	fases	73
(b)	taxa de deformação	73
(c)	velocidade	73
4.32	Campos numéricos no plano $z=0.25$ m para $Re=116$.	73
(a)	fases	73
(b)	taxa de deformação	73
(c)	velocidade	73
4.33	Campos numéricos no plano $z=0.35$ m para $Re=116$.	73
(a)	fases	73
(b)	taxa de deformação	73
(c)	velocidade	73
4.34	Campos de fração volumétrica para todos os Re .	74
4.35	Campos de fração volumétrica em um plano axial para todos os Re investigados.	75
4.36	Campos numéricos em plano axial para glicerina 60% deslocando fluido viscoplástico com $\tau_y = 5$ kPa para $Re=116$.	75
(a)	fases	75
(b)	taxa de deformação	75
(c)	velocidade	75

4.37	Campos numéricos em cortes transversais do deslocamento do fluido viscoplástico com $\tau_y = 5$ kPa pela glicerina 60% para $Re=116$.	76
(a)	fases	76
(b)	taxa de deformação	76
(c)	velocidade	76
4.38	Campos numéricos em plano axial para glicerina 60% deslocando fluido viscoplástico com $\tau_y = 10$ kPa para $Re=116$.	76
(a)	fases	76
(b)	taxa de deformação	76
(c)	velocidade	76
4.39	Campos numéricos em cortes transversais do deslocamento do fluido viscoplástico com $\tau_y = 10$ kPa deslocado pela glicerina 60% para $Re=116$.	76
(a)	fases	76
(b)	taxa de deformação	76
(c)	velocidade	76
4.40	Campos numéricos no plano axial para $\rho_1 = \rho_2$ e $\eta_r = 2.75e-04$.	77
(a)	fases	77
(b)	taxa de deformação	77
(c)	velocidade	77
4.41	Cortes transversais em $z=0.23$ m, 0.25 m e 0.31 m para $\rho_1 = \rho_2$ e $\eta_r = 2.75e-04$.	77
(a)	fases	77
(b)	taxa de deformação	77
(c)	velocidade	77
4.42	Campos numéricos em um plano axial para $\rho_1 = \rho_2$ e $\eta_r = 4.10e-04$.	78
(a)	fases	78
(b)	taxa de deformação	78
(c)	velocidade	78
4.43	Cortes transversais em $z=0.23$ m, 0.25 m e 0.31 m para $\rho_1 = \rho_2$ e $\eta_r = 4.10e-04$.	78
(a)	fases	78
(b)	taxa de deformação	78
(c)	velocidade	78
4.44	Isocurva de velocidade do fluido deslocador para $\rho_1 > \rho_2$ e $\eta_r = 2.75e-04$.	79
4.45	Cortes transversais em $z=0.23$ m, 0.25 m e 0.31 m para $\rho_1 > \rho_2$ e $\eta_r = 2.75e-04$.	79
(a)	fases	79
(b)	taxa de deformação	79
(c)	velocidade	79
4.46	Campos numéricos para corte transversal em $z=0.25$ m para $\rho_1 > \rho_2$ e $\eta_r = 2.75e-04$.	79
(a)	fases	79
(b)	taxa de deformação	79
(c)	velocidade	79
4.47	Campos numéricos para corte transversal em $z=0.28$ m para $\rho_1 > \rho_2$ e $\eta_r = 2.75e-04$.	79

(a) fases	79
(b) taxa de deformação	79
(c) velocidade	79
4.48 Campos numéricos para corte transversal em $z=0.31$ m para $\rho_1 > \rho_2$ e $\eta_r=2.75e-04$.	80
(a) fases	80
(b) taxa de deformação	80
(c) velocidade	80
4.49 Isocurva da velocidade do fluido deslocador para $\rho_1 > \rho_2$ e $\eta_r=4.10e-04$.	80
4.50 Cortes transversais em $z=0.25$ m, 0.28 m e 0.31 m para $\rho_1 > \rho_2$ e $\eta_r=4.10e-04$.	80
(a) fases	80
(b) taxa de deformação	80
(c) velocidade	80
4.51 Campos numéricos para corte transversal em $z=0.25$ m para $\rho_1 > \rho_2$ e $\eta_r=4.10e-04$.	81
(a) fases	81
(b) taxa de deformação	81
(c) velocidade	81
4.52 Campos numéricos para corte transversal em $z=0.28$ m para $\rho_1 > \rho_2$ e $\eta_r=4.10e-04$.	81
(a) fases	81
(b) taxa de deformação	81
(c) velocidade	81
4.53 Campos numéricos para corte transversal em $z=0.31$ m para $\rho_1 > \rho_2$ e $\eta_r=4.10e-04$.	81
(a) fases	81
(b) taxa de deformação	81
(c) velocidade	81
4.54 Curva de eficiência de deslocamento para os casos estudados.	82
(a) $\rho_1 = \rho_2$	82
(b) $\rho_1 > \rho_2$	82
4.55 Campos numéricos em plano axial do deslocamento de um fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $Re=49$.	83
(a) fases	83
(b) taxa de deformação	83
(c) velocidade	83
4.56 Campos numéricos em plano axial do deslocamento de um fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $Re=116$.	83
(a) fases	83
(b) taxa de deformação	83
(c) velocidade	83
4.57 Carbopol variando Re .	84
4.58 Campos numéricos em plano axial do deslocamento de um fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $\tau_y = 6$ kPa na posição concêntrica e vertical.	84
(a) fases	84

(b)	taxa de deformação	84
(c)	velocidade	84
4.59	Campos numéricos em planos transversais do deslocamento do fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $\tau_y = 6$ kPa na posição concêntrica e vertical.	85
(a)	fases	85
(b)	taxa de deformação	85
(c)	velocidade	85
4.60	Campos numéricos no plano transversal $z=0.25$ m do deslocamento do fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $\tau_y = 6$ kPa na posição concêntrica e vertical.	85
(a)	fases	85
(b)	taxa de deformação	85
(c)	velocidade	85
4.61	Campos numéricos no plano transversal $z=0.28$ m do deslocamento do fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $\tau_y = 6$ kPa na posição concêntrica e vertical.	85
(a)	fases	85
(b)	taxa de deformação	85
(c)	velocidade	85
4.62	Campos numéricos no plano transversal $z=0.31$ m do deslocamento do fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $\tau_y = 6$ kPa na posição concêntrica e vertical.	86
(a)	fases	86
(b)	taxa de deformação	86
(c)	velocidade	86
4.63	Campos numéricos em plano axial do deslocamento de um fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $\tau_y = 10$ kPa na posição concêntrica e vertical.	86
(a)	fases	86
(b)	taxa de deformação	86
(c)	velocidade	86
4.64	Campos numéricos em planos transversais do deslocamento do fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $\tau_y = 10$ kPa na posição concêntrica e vertical.	86
(a)	fases	86
(b)	taxa de deformação	86
(c)	velocidade	86
4.65	Campos numéricos no plano transversal $z=0.25$ m do deslocamento do fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $\tau_y = 10$ kPa na posição concêntrica e vertical.	87
(a)	fases	87
(b)	taxa de deformação	87
(c)	velocidade	87
4.66	Campos numéricos no plano transversal $z=0.28$ m do deslocamento do fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $\tau_y = 10$ kPa na posição concêntrica e vertical.	87
(a)	fases	87

(b)	taxa de deformação	87
(c)	velocidade	87
4.67	Campos numéricos no plano transversal $z=0.31$ m do deslocamento do fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $\tau_y = 10$ kPa na posição concêntrica e vertical.	87
(a)	fases	87
(b)	taxa de deformação	87
(c)	velocidade	87
4.68	Campos numéricos em plano axial do deslocamento de um fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $\tau_y = 6$ kPa na posição excêntrica e vertical.	88
(a)	fases	88
(b)	taxa de deformação	88
(c)	velocidade	88
4.69	Campo numéricos em planos transversais do deslocamento do fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $\tau_y = 6$ kPa na posição excêntrica e vertical.	88
(a)	fases	88
(b)	taxa de deformação	88
(c)	velocidade	88
4.70	Campos numéricos no plano transversal $z=0.25$ m do deslocamento do fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $\tau_y = 6$ kPa na posição excêntrico e vertical.	88
(a)	fases	88
(b)	taxa de deformação	88
(c)	velocidade	88
4.71	Campos numéricos no plano transversal $z=0.28$ m do deslocamento do fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $\tau_y = 6$ kPa na posição excêntrica e vertical.	89
(a)	fases	89
(b)	taxa de deformação	89
(c)	velocidade	89
4.72	Campos numéricos no plano transversal $z=0.31$ m do deslocamento do fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $\tau_y = 6$ kPa na posição excêntrica e vertical.	89
(a)	fases	89
(b)	taxa de deformação	89
(c)	velocidade	89
4.73	Campos numéricos em plano axial do deslocamento de um fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $\tau_y = 10$ kPa na posição excêntrica e vertical.	89
(a)	fases	89
(b)	taxa de deformação	89
(c)	velocidade	89
4.74	Campos numéricos em planos transversais do deslocamento de um fluido viscoplástico para $\tau_y = 10$ kPa na posição excêntrica e vertical.	89
(a)	fases	89
(b)	taxa de deformação	89

(c) velocidade	89
4.75 Campos numéricos no plano transversal $z=0.25$ m do deslocamento de um fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $\tau_y = 10$ kPa na posição excêntrica e vertical.	90
(a) fases	90
(b) taxa de deformação	90
(c) velocidade	90
4.76 Campos numéricos no plano transversal $z=0.28$ m do deslocamento de um fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $\tau_y = 10$ kPa na posição excêntrica e vertical.	90
(a) fases	90
(b) taxa de deformação	90
(c) velocidade	90
4.77 Campos numéricos no plano transversal $z=0.31$ m do deslocamento de um fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $\tau_y = 10$ kPa na posição excêntrica e vertical.	90
(a) fases	90
(b) taxa de deformação	90
(c) velocidade	90
4.78 Glicerina 60% deslocando fluido viscoplástico para $\tau_y = 10$ kPa, concêntrico e inclinado.	91
(a) fases	91
(b) taxa de deformação	91
(c) velocidade	91
4.79 Campos numéricos em planos transversais do deslocamento de um fluido viscoplástico para $\tau_y = 10$ kPa na posição concêntrica e inclinado.	91
(a) fases	91
(b) taxa de deformação	91
(c) velocidade	91
4.80 Campos numéricos no plano transversal $z=0.25$ m do deslocamento de um fluido viscoplástico para $\tau_y = 10$ kPa na posição concêntrica e inclinado.	91
(a) fases	91
(b) taxa de deformação	91
(c) velocidade	91
4.81 Campos numéricos no plano transversal $z=0.28$ m do deslocamento de um fluido viscoplástico para $\tau_y = 10$ kPa na posição concêntrica e inclinado.	91
(a) fases	91
(b) taxa de deformação	91
(c) velocidade	91
4.82 Campos numéricos no plano transversal $z=0.31$ m do deslocamento de um fluido viscoplástico para $\tau_y = 10$ kPa na posição concêntrica e inclinado.	92
(a) fases	92
(b) taxa de deformação	92
(c) velocidade	92

4.83	Curva da eficiência de deslocamento para os casos estudados.	93
4.84	Campos numéricos em plano axial para $\rho_1 = \rho_2$, $\tau_{y1} < \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1.31$.	94
	(a) fases	94
	(b) taxa de deformação	94
	(c) velocidade	94
4.85	Campos numéricos em planos transversais para $\rho_1 = \rho_2$, $\tau_{y1} < \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1.31$.	94
	(a) fases	94
	(b) taxa de deformação	94
	(c) velocidade	94
4.86	Campos numéricos no plano transversal $z=0.25$ m para $\rho_1 = \rho_2$, $\tau_{y1} < \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1.31$.	94
	(a) fases	94
	(b) taxa de deformação	94
	(c) velocidade	94
4.87	Campos numéricos no plano transversal $z=0.28$ m para $\rho_1 = \rho_2$, $\tau_{y1} < \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1.31$	94
	(a) fases	94
	(b) taxa de deformação	94
	(c) velocidade	94
4.88	Campos numéricos no plano transversal $z=0.31$ m para $\rho_1 = \rho_2$, $\tau_{y1} < \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1.31$.	95
	(a) fases	95
	(b) taxa de deformação	95
	(c) velocidade	95
4.89	Campos numéricos em plano axial para $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} = \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1$.	95
	(a) fases	95
	(b) taxa de deformação	95
	(c) velocidade	95
4.90	Campos numéricos em planos transversais para $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} = \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1$.	95
	(a) fases	95
	(b) taxa de deformação	95
	(c) velocidade	95
4.91	Campos numéricos no plano transversal $z=0.25$ m para $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} = \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1$.	95
	(a) fases	95
	(b) taxa de deformação	95
	(c) velocidade	95
4.92	Campos numéricos no plano transversal $z=0.28$ m para $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} = \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1$.	96
	(a) fases	96
	(b) taxa de deformação	96
	(c) velocidade	96
4.93	Campos numéricos no plano transversal $z=0.31$ m para $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} = \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1$.	96
	(a) fases	96
	(b) taxa de deformação	96

(c)	velocidade	96
4.94	Campo numérico em plano axial para $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} < \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1.31$.	96
(a)	fases	96
(b)	taxa de deformação	96
(c)	velocidade	96
4.95	Campos numéricos em plano transversal para $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} < \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1.31$.	96
(a)	fases	96
(b)	taxa de deformação	96
(c)	velocidade	96
4.96	Campos numéricos no plano transversal $z=0.25$ m para $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} < \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1.31$.	97
(a)	fases	97
(b)	taxa de deformação	97
(c)	velocidade	97
4.97	Campos numéricos no plano transversal $z=0.28$ m para $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} < \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1.31$.	97
(a)	fases	97
(b)	taxa de deformação	97
(c)	velocidade	97
4.98	Campos numéricos no plano transversal $z=0.31$ m para $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} < \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1.31$.	97
(a)	fases	97
(b)	taxa de deformação	97
(c)	velocidade	97
4.99	Campos numéricos em plano axial para $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} > \tau_{y2}$ e $\eta_r = 0.76$.	98
(a)	fases	98
(b)	taxa de deformação	98
(c)	velocidade	98
4.100	Campos numéricos em planos transversais para $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} > \tau_{y2}$ e $\eta_r = 0.76$.	98
(a)	fases	98
(b)	taxa de deformação	98
(c)	velocidade	98
4.101	Campos numéricos no plano transversal $z=0.25$ m para $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} > \tau_{y2}$ e $\eta_r = 0.76$.	98
(a)	fases	98
(b)	taxa de deformação	98
(c)	velocidade	98
4.102	Campos numéricos no plano transversal $z=0.28$ m para $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} > \tau_{y2}$ e $\eta_r = 0.76$.	98
(a)	fases	98
(b)	taxa de deformação	98
(c)	velocidade	98
4.103	Campos numéricos no plano transversal $z=0.31$ m para $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} > \tau_{y2}$ e $\eta_r = 0.76$.	99
(a)	fases	99
(b)	taxa de deformação	99

(c) velocidade

99

Lista de tabelas

2.1	Dados de entrada dos testes experimentais.	33
4.1	Propriedades da água e do etilenoglicol.	49
4.2	Casos experimentais estudados.	49
4.3	Propriedades da água e do óleo soya.	50
4.4	Casos experimentais estudados.	51
4.5	Propriedades das soluções de glicerina de 30% e 60%.	52
4.6	Propriedades da goma xantana de 0.1% e 0.08%.	53
4.7	Casos estudados.	59
4.8	Casos experimentais estudados.	61
4.9	Propriedades da n-parafina.	68
4.10	Propriedades dos fluidos de perfuração 1 e 2.	68
4.11	Casos estudados.	69
4.12	Tabela de razão de viscosidades para fluido pseudoplástico.	74
4.13	Razão de viscosidades para o fluido viscoplástico.	83
4.14	Parâmetros das simulações.	83
4.15	Dados dos casos estudados.	92

1

Introdução

O deslocamento de um fluido por outro está presente em diversos processos industriais. Os processos mais comuns estão na indústria de petróleo, como perfuração, completação e cimentação de poços, recuperação secundária e reinício de escoamento, por exemplo.

Neste capítulo serão apresentados a motivação do trabalho e revisão bibliográfica referente ao problema estudado.

1.1

Motivação

A operação de cimentação de um poço de petróleo é de grande importância porque o sucesso desta operação garante a vida útil do poço. Para que isso ocorra é necessário que a pasta de cimento esteja homogeneamente distribuída no espaço anular. A completa remoção do fluido de perfuração contido no espaço formado entre a formação rochosa e a coluna de perfuração é essencial para a operação. Esta remoção é feita pela injeção do fluido de perfuração no espaço anular. Por isso, o conhecimento de todos os parâmetros que afetam o deslocamento de um fluido pelo outro é fundamental para o perfeito funcionamento do poço.

A fig.1.1 apresenta um exemplo de falha na cimentação respectivamente. As propriedades reológicas, vazão de bombeio, a mistura na interface desses fluidos impactam diretamente na eficiência de deslocamento.

Falhas na cimentação, entre outros problemas, são causas de acidentes na extração e exploração de petróleo. Um dos piores acidentes recentes da história foi em 2010 no Golfo do México. A plataforma Deepwater Horizon da empresa BP explodiu matando onze pessoas.

No presente trabalho uma investigação sobre a eficiência de deslocamento de fluidos newtonianos e não newtonianos em espaço anular foi realizada. O estudo experimental foi realizado em um poço em escala construído para operar em configurações concêntrica ou excêntrica e vertical ou inclinada em regime de escoamento laminar. Na investigação numérica foi utilizado o *software* OpenFOAM para a solução das equações governantes envolvidas.



Figura 1.1: Exemplo de falha na cimentação (?)

Foram analisadas a influência das razões de densidade e viscosidade, configurações da geometria do poço, vazões de bombeio e diferentes fluidos. Na avaliação dos resultados a interpretação da interface de deslocamento foi utilizada de forma qualitativa. A eficiência de deslocamento foi quantificada pela curva da densidade da mistura na saída do anular em função do volume de fluido deslocador bombeado. Dessa forma é possível avaliar quantitativamente o nível de contaminação dos fluidos.

1.2

Revisão bibliográfica

O deslocamento de um fluido por um outro pode ser encontrado em diferentes processos industriais. São processos comuns na indústria de petróleo (cimentação, recuperação secundária, reinício de escoamento), aplicações biomédicas, limpeza de equipamento entre outros. Esses escoamentos ocorrem em dutos, espaços anulares e meios porosos, por exemplo. A eficiência de deslocamento entre dois fluidos é influenciada pelas razões de densidade e viscosidade, tipo de fluidos envolvido no processo (newtonianos e não newtonianos), geometria concêntrica e excêntrica, parâmetros reológicos dos fluidos não newtonianos e vazão de bombeio dos fluidos.

O estudo desses processos industriais envolvendo deslocamentos de um fluido pelo outro é realizado por meio de formulações teóricas, testes experimentais e simulações numéricas. Este último vem sendo amplamente utilizado pela praticidade e bons resultados para os problemas. As análises experimentais envolvem a visualização da interface de deslocamento entre os dois fluidos, análise utilizando PIV, etc. No entanto, investigações experimentais não são sempre possíveis devido aos custos elevados, dificuldade em reproduzir condições reais de teste.

No processo de recuperação secundária do óleo, a produção de óleo está condicionada ao resultado do deslocamento do óleo pela água ou gás no reservatório. Neste caso o deslocamento de um fluido pelo outro ocorre em um meio poroso. O volume de óleo recuperado está limitado à eficiência de deslocamento do óleo pela água ou gás. Na recuperação secundária apenas deslocamentos imiscíveis são realizados. Buckley e Leverett (1) descrevem de modo qualitativo algumas das características do deslocamento do óleo por gás ou água com o intuito de entender as diferenças entre os mecanismos e melhorar a eficiência dos mesmos.

O processo de perfuração de um poço de petróleo ocorre por uma sonda, onde rochas são perfuradas pela ação de rotação e peso aplicados a uma broca existente na extremidade de uma coluna de perfuração. Durante a perfuração são gerados cascalhos de rochas que são removidos pela injeção de fluido de perfuração no interior da coluna de perfuração e retornam à superfície através do espaço anular formado entre a coluna de perfuração e a parede do poço. Após uma determinada profundidade, a coluna de perfuração é retirada e uma coluna de revestimento é inserida no poço. Esta coluna possui um diâmetro inferior ao da broca. O espaço anular formado entre a parede do poço e a coluna de revestimento é cimentado para isolar as rochas atravessadas, garantindo o prosseguimento seguro da operação de perfuração do poço. Este procedimento ocorre sucessivamente até a perfuração completa do poço (2).

O processo de completação de um poço é determinante para a sua vida útil, garantindo que o mesmo opere de forma segura e econômica.

Após a perfuração de um poço de exploração de petróleo, o fluido de perfuração, que tem a função de lubrificar, resfriar a broca e remover o cascalho produzido, deve ser removido e substituído por uma pasta de cimento. Esta, após o tempo de cura, tem a função de garantir a integridade estrutural do poço. A cimentação é uma operação crucial na vida de um poço de petróleo. Para uma operação bem feita, é preciso assegurar que foi removida a maior quantidade possível de fluido de perfuração existente na região anular entre a formação rochosa e a coluna de perfuração ou de revestimento (“casing”). Esse processo é feito de tal maneira que o cimento desloca o fluido de perfuração num escoamento que pode ser em regime laminar ou turbulento, numa geometria anular, em geral excêntrica. Uma vez deslocado o fluido de perfuração pelo cimento, este adere à parede do poço e durante um período de tempo vai adquirindo as propriedades mecânicas de interesse como aderência, resistência à compressão e impermeabilidade. As etapas do processo de cimentação são apresentadas esquematicamente na fig.1.2

O deslocamento de um fluido pelo outro em geometrias anulares são

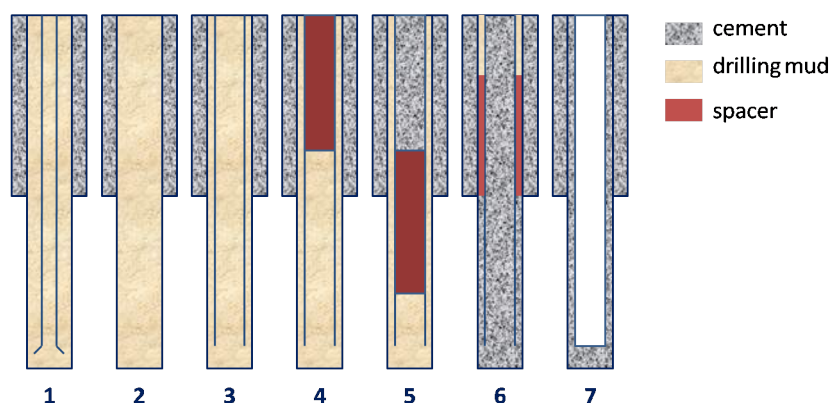


Figura 1.2: Etapas do processo de cimentação.

importantes para a operação primária de cimentação pois garante a vida útil do poço. A reologia dos fluidos e a hierarquia de densidades são fatores determinantes na seleção do cimento. Szabo e Hassager (3) investigaram o efeito da diferença de densidades entre o fluido deslocado (cimento) e o fluido deslocador (fluidos de perfuração, espaçadores etc). Os fluidos foram considerados imiscíveis, newtonianos e de viscosidades iguais para reduzir o número de parâmetros adimensionais. Uma análise numérica utilizando o método dos elementos finitos com modelo Lagrangeano-Euleriano é utilizado. Para avaliar a interface entre os dois fluidos durante o deslocamento, uma malha computacional deformável foi utilizada para acompanhar com precisão o deslocamento da interface. Observa-se que um fluido deslocador mais denso melhora o resultado na operação de cimentação. Para geometria concêntrica, essa melhora é devida a interface plana entre os dois fluidos. Para geometrias excêntricas, o fluido mais denso induz um transporte de fluidos na direção azimutal do espaço maior para o menor, o que melhora a operação de cimentação.

O primeiro estudo de escoamento de fluidos não newtonianos em anulares concêntricos foi realizado por Frederickson e Bird (4). O trabalho consistiu em uma discussão sobre uma solução analítica da equação de movimento para escoamento axial permanente e incompressível de um fluido não newtoniano em anular de comprimento longo. Este estudo tem ampla aplicação como por exemplo em problemas de transferência de calor, extrusão de polímeros, além de escoamento de fluidos de perfuração.

Hanks e Larsen (5) propuseram uma solução algébrica para a vazão volumétrica de um fluido Power-Law para um escoamento laminar. O objetivo do trabalho é eliminar a necessidade de interpolação das análises gráficas ou simulações diretas.

Hanks (6) também propôs uma abordagem analítica através do desen-

volvimento de gráficos com o objetivo de melhorar o projeto de anulares concêntricos que transportam fluidos não newtonianos. Os gráficos foram gerados utilizando soluções teóricas das equações de movimento para anulares concêntricos e modelos de viscosidade Power-Law e Herschel-Bulkley. Um exemplo prático de aplicação das soluções gráficas é a medição da queda de pressão para os parâmetros reológicos conhecidos em um dado anular concêntrico.

Walton e Bittleston (7) estudaram analítica e numericamente o escoamento de fluidos de Bingham em anulares excêntricos. Teoria e resultados numéricos foram comparados para uma série de excentricidades, razões de raios, propriedades dos fluidos e parâmetros de escoamento. Os resultados apresentaram boa concordância especialmente em razões de raios maiores que 0.7.

O deslocamento completo do fluido de perfuração do espaço anular é fundamental para o sucesso da cimentação primária. Clark e Carter (8) reexaminaram as condições de deslocamento através da importância das forças envolvidas no deslocamento da pasta de cimento pelo fluido de perfuração. Foram analisadas as forças de resistência e as forças motoras do processo. O estudo foi realizado experimentalmente em um modelo em escala. A eficiência de deslocamento dos casos foi calculada através da razão de áreas da pasta de cimento e a área do anula em um corte transversal. Os resultados obtidos mostraram que a rotação e reciprocção da coluna é a principal força motora na remoção do fluido de perfuração. Para um fluido de perfuração bem condicionado ocorre o aumento da eficiência de deslocamento. A força de empuxo resultante da diferença de densidades da pasta de cimentação e fluido de perfuração tem menos influência no deslocamento do que o esperado. O regime turbulento afeta a interface de deslocamento e passa a ser uma das forças motoras na remoção do fluido de perfuração.

Beirute e Flumerfelt (9) trabalharam no desenvolvimento de um modelo matemático para descrever o deslocamento miscível do fluido de perfuração pela pasta de cimento em regime laminar de escoamento. O modelo leva em conta os efeitos de diferentes propriedades, vazões de bombeio e geometrias. Além disso, despreza os efeitos de mistura no deslocamento causado por difusão molecular. O modelo de viscosidade utilizado para obter os parâmetros reológicos do fluido de perfuração e da pasta de cimento foi o Robert-Stiff. A aplicabilidade do modelo em diferentes condições de deslocamento permite a avaliação das condições ótimas de deslocamento e com isso uma melhor escolha das propriedades dos fluidos melhorando a eficiência de deslocamento. Esse estudo apontou que a tensão limite de escoamento é crítica no deslocamento dos fluidos. O modelo mostra que para a tensão limite de escoamento do fluido de perfuração menor do que a da pasta de cimento ocorre a canalização da

pasta de cimento no fluido de perfuração

Mc Clean e Whitaker (10) também observaram que em anulares excêntricos o deslocamento da pasta de cimento tende a ocorrer pela parte mais larga da geometria ficando o fluido de perfuração canalizado na parte mais estreita. Esta tendência é função da densidade dos fluidos, da vazão de bombeio e da geometria. Para evitar que isso ocorra é necessário que o gradiente de pressão gerado pela circulação do cimento e a força de empuxo seja maior que o gradiente de pressão necessário para remover o fluido de perfuração da região mais estreita com a mesma velocidade da pasta de cimento. Modelos analíticos e dados experimentais foram utilizados para descrever o mecanismo de deslocamento do fluido de perfuração pela pasta de cimento. Os resultados mostram que para vazões de bombeio adequadas ocorre o deslocamento tipo "pistão" para a pasta e fluido de perfuração de mesma densidade.

Uma análise experimental de um escoamento laminar entre dois cilindros excêntricos foi realizado por Tehrani et al. (11). O projeto usa o método de condutividade para mensurar pico axial de velocidades em torno do anular e também para determinar a eficiência de deslocamento de um fluido deslocando o outro. A eficiência de deslocamento é definida pela razão entre o volume do fluido deslocado removido e o volume do anular depois de um determinado número de volumes de anular bombeados. Em anulares excêntricos a baixa velocidade na parte estreita faz com que ocorra a canalização do fluido deslocado, enquanto a parte mais larga está preenchida pelo fluido deslocador, fazendo com que ocorra a queda da eficiência de deslocamento. Os resultados mostram que a excentricidade tem uma grande influência no deslocamento de fluidos e que o aumento da vazão produz um aumento significativo na eficiência de deslocamento. Já quando a densidade do fluido deslocador é maior que a do fluido deslocado ocorre uma melhora na eficiência de deslocamento na posição vertical. A visualização do escoamento na direção azimutal mostra a ocorrência de instabilidades quando a densidade do fluido deslocador é maior que a do fluido deslocado. Isso acelera o deslocamento mas canaliza parte do fluido a ser deslocado na parte mais estreita do anular. Ajustes na pressão e vazão são necessárias para minimizar este problema.

Medições dos componentes do vetor velocidade médio foram medidos utilizando velocimetria a laser em escoamento completamente desenvolvido (Nouri e Whitelaw (12)). O estudo foi feito para anulares concêntrico e excêntrico em regime turbulento. O fluido não newtoniano estudado era pseudoplástico e sem elasticidade. Já Escudier et al. (13) realizou uma investigação experimental e numérica para escoamentos laminares de fluidos pseudoplásticos em anulares. O efeito viscoelástico não foi avaliado e resultados comparativos

mostraram que o mesmo é desprezível.

Alba e Frigaard (14). investigaram teórica e experimentalmente o deslocamento de um fluido viscoplástico por um fluido newtoniano miscível em um tubo inclinado. O fluido deslocador é mais denso que o fluido deslocado, caracterizando uma configuração de densidade instável. Para um melhor entendimento, foram avaliados os parâmetros adimensionais como Re , Fr e Bi . Através de uma abordagem teórico-experimental foram estimados as tensões interfaciais e de cisalhamento. Essas informações são importantes para o desenvolvimento dos fluidos que serão deslocados. Foi utilizado *Ultrasonic Doppler Velocimetry* para a análise da dinâmica de remoção do fluido viscoplástico do interior do tubo, onde foram observados três formatos de interface distintos. Os resultados mostraram dois padrões de escoamento e transição entre os escoamentos ocorre para $600 < Re/Fr < 800$.

Na operação de cimentação os parâmetros envolvidos na eficiência de deslocamento em poços verticais são as razões de densidades e viscosidade, a vazão de bombeio dos fluidos, a geometria do poço (excêntrico ou concêntrico) e propriedades dos fluidos (Haut e Crook, (15, 16); Sauer, (17); Lockyear e Hibbert, (18)).

Tehrani et al. (19) realizaram uma investigação teórica e experimental do deslocamento de fluidos de perfuração em anulares excêntricos em regime laminar. Os resultados mostraram que para fluidos deslocadores de maior densidade o processo é mais eficiente.

Uma comparação numérica e experimental foi realizada por Vefring et al.(20). O estudo analisou a influência dos parâmetros reológicos dos fluidos durante deslocamento do fluido de perfuração pela pasta de cimento. Os resultados obtidos mostraram boa concordância indicando que a análise numérica produz resultados satisfatórios.

Nos trabalhos de Frigaard et al. (21) e Frigaard e Pelipenko (22) uma expressão analítica foi obtida para o formato da interface entre os dois fluidos durante o deslocamento da pasta de cimento em geometrias excêntricas, através de uma modelagem 2D.

Os fenômenos físicos envolvidos no deslocamento do fluido de perfuração em espaços anulares excêntricos foram estudados através de experimentos por Jakobsen et al. (23). Os resultados mostram que para anulares excêntricos o deslocamento tende a canalizar na região mais estreita do anular. Este efeito pode ser amenizado quando regime de escoamento turbulento.

No processo de cimentação, para que não ocorra a contaminação entre a pasta de cimento e o fluido de perfuração, são deslocados soluções de água e detergente chamados de colchões. Esses colchões podem ser espaçadores

ou lavadores e apresentam comportamento newtoniano. Guillot et al. (24) investigaram o deslocamento do fluido de perfuração por um colchão em geometria excêntrica por uma análise teórica. Os resultados foram obtidos para regimes de escoamento laminar e turbulento onde a densidade do colchão era superior a do fluido de perfuração. A análise mostrou que para o regime de escoamento turbulento a interface de deslocamento entre os dois fluidos é mais plana.

Muitos estudos envolvendo deslocamento de fluidos viscoplásticos por fluidos miscíveis estão disponíveis na literatura. Durante o processo de completação de um poço de petróleo são realizadas injeções sucessivas de fluidos de perfuração, pasta de cimento e colchões espaçadores. Gabard e Hulin (25) por exemplo, estudaram experimentalmente o deslocamento de fluidos não newtonianos miscíveis no interior de um tubo vertical. Foram utilizados fluidos viscoplásticos e pseudoplásticos deslocados por um fluido newtoniano miscível de mesma densidade porém de menor viscosidade do que os fluidos não newtonianos. Os resultados mostraram que a camada residual inicial diminui drasticamente para fluidos pseudoplásticos de mesma densidade comparados ao caso base newtoniano. O mesmo ocorre para fluidos viscoplásticos.

O conhecimento do regime de escoamento durante o processo de perfuração, completação e cimentação é de extrema importância para as operações. Em algumas situações, dependendo da geometria do poço e propriedades dos fluidos é desejável que o regime de escoamento durante o deslocamento seja turbulento aumentando a eficiência de deslocamento entre os fluidos durante o processo. Erge et al. (26) fez uma análise da transição entre o escoamento laminar e turbulento de fluidos com tensão limite de escoamento para geometrias concêntricas e excêntricas. O objetivo era investigar a estabilidade do escoamento utilizando abordagens experimental e teórica para entender a transição dos tipos de escoamento. O critério de estabilidade é baseado na produção de energia turbulenta e a taxa de trabalho produzido pela tensão viscosa e utilizada para determinar a fim do escoamento laminar. O modelo proposto permitiu prever a transição entre os escoamentos laminar e turbulento para as diferentes excentricidades, razões de diâmetros e propriedades dos fluidos. Os resultados obtidos mostram concordância entre o modelo proposto e dados experimentais para geometrias excêntricas.

Dutra et al. (27) investigaram numericamente o escoamento de dois fluidos em espaços anulares excêntricos. Os efeitos dos parâmetros reológicos dos fluidos e a excentricidade da geometria na eficiência de deslocamento foram estudados para diferentes vazões de bombeio. Os resultados indicam que a eficiência é maior quando o fluido mais viscoso desloca o fluido menos viscoso.

Foi observado também que o formato da interface está diretamente relacionado ao regime de escoamento e razão de viscosidade dos fluidos envolvidos.

Trabalhos realizados por Savery et al.(28) mostram que o escoamento em geometrias anulares é na maioria dos casos 3D, sendo necessária a solução completa das equações de Navier-Stokes juntamente com as equações constitutivas referentes aos fluidos não newtonianos envolvidos. Devido ao alto custo computacional para a obtenção de resultados satisfatórios, alguns modelos utilizando métodos para escalonar o problema foram desenvolvidos.

Durante a circulação do fluido de perfuração e pasta de cimento pode ocorrer a rotação e reciprocação da coluna de perfuração. Tardy e Bittleston (29) desenvolveram um modelo matemático e numérico para a solução do escoamento e deslocamento de fluidos de completação no espaço anular formado entre a formação e a coluna de perfuração. Modelo contempla todos os parâmetros envolvidos durante a operação, como por exemplo razão de densidades dos fluidos, parâmetros reológicos, entre outros já citados. O modelo matemático é baseado na teoria de lubrificação.

Um sistema experimental para estudos de escoamentos monofásicos e bifásicos em anulares excêntricos foi desenvolvido por Deawwanich (30). Neste experimento, o escoamento de fluidos miscíveis é helicoidal, combinando o escoamento axial com o tangencial proveniente da rotação da coluna interna da geometria. Esse sistema permite a investigação do efeito que a rotação da coluna interna proporciona na eficiência de deslocamento. Os resultados foram analisados tanto através da visualização da interface de deslocamento quanto medindo a condutividade da mistura dos fluidos na saída no anular. Esses resultados foram comparados com código de CFD e utilizados na validação das simulações.

Zulquarnain e Tyagi (31) realizaram um estudo numérico do deslocamento do fluido de perfuração pelos espaçadores e pela pasta de cimento. Para o trabalho foi considerado um modelo de anular de 50 ft sendo 2D para os casos concêntricos e 3D para os excêntricos. O software comercial ANSYS Fluent foi utilizado para a resolver as equações que governam o problema. Os resultados obtidos foram comparados com dados experimentais e mostram que espaçadores de baixa densidade e viscosidade não mantêm o fluido de perfuração e o cimento separados mas em compensação a mistura formada pelo fluidos ajuda na remoção do fluido de perfuração das paredes do anular.

2

Metodologia Experimental

2.1

Seção de Testes

A seção de testes do simulador físico representa o espaço anular de um poço em escala antes da cimentação. A seção de testes é composta por um tubo de acrílico de diâmetro externo igual a 34.5 mm e por um tarugo interno de diâmetro igual a 16 mm. O comprimento total do poço em escala é de 1070 mm. Dessa forma, o escoamento dos fluidos ocorre apenas no espaço anular. Nesta seção diversas configurações de poço são permitidas de forma versátil, sem a necessidade de desmontar o experimento. Toda a estrutura que sustenta os tubos também foi construída em acrílico tornando-a mais leve e robusta. A limitação da seção de testes é que apenas escoamentos laminares podem ser realizados. A seção de testes do poço em escala é apresentado em detalhes na fig.2.1.



Figura 2.1: Seção de testes (*Créditos foto: Alexandra Aliche*).

As configurações de geometrias de poço permitidas são: concêntrico

ou excêntrico e vertical ou inclinado, sendo possível diferentes valores de excentricidade e inclinação. A fig.2.2 apresenta testes com par de fluidos óleo (deslocado) e água (deslocador). Nestes experimentos foram utilizadas diferentes configurações de poço. A primeira mostra um poço concêntrico e vertical, a segunda um excêntrico 75% e vertical e a terceira concêntrico e inclinado 45°.

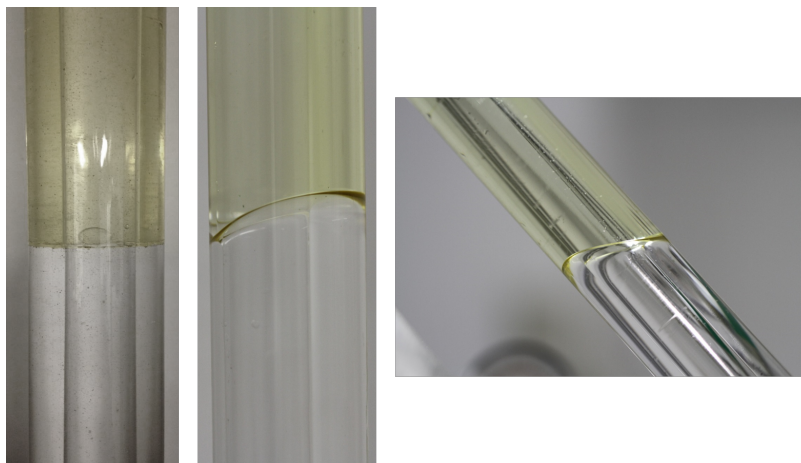


Figura 2.2: Exemplo com diferentes configurações de geometria.

A montagem do experimento permite que o controle da excentricidade seja feita pelo deslocamento do tarugo interno em dois eixos horizontais passantes, localizados na parte superior e inferior do tubo externo. Para modificar a excentricidade dos tubos não é necessário desmontar o experimento, otimizando a execução dos testes além de permitir a utilização de qualquer valor de excentricidade. A fig.2.3 mostra em detalhes esse sistema.

A inclinação da seção de testes também pode ser alterada. O ângulo de inclinação é medido por um transferidor preso na parte inferior da montagem.

O deslocamento dos fluidos é realizado pela bomba de deslocamento positivo NETZSCH (fig.2.4), conectada a um dos reservatórios de fluidos. A utilização da bomba de deslocamento positivo permite um melhor controle da vazão imposta, mas limita o tipo de fluido deslocador só permitindo o deslocamento de fluidos base água.

Na saída do anular foi acoplado um medidor de vazão coriollis MicroMotion, juntamente com um densitômetro. Esse medidor permite o controle da densidade, temperatura e vazão do escoamento na saída do poço. Um computador acoplado ao sistema permite a aquisição dos desses dados através do *software* ProLink III. A fig.2.6 apresenta a interface do *software* de aquisição de dados do densitômetro.



Figura 2.3: Mecanismo de excentricidade e controle da inclinação.



Figura 2.4: Bomba de deslocamento positivo NETZSCH.

A geometria do densitômetro é apresentada em detalhes na fig.2.5. O fluido escoa internamente no medidor de Coriolis e os dados de densidade e vazão são adquiridos pelo transmissor multivariável MVD 2700.

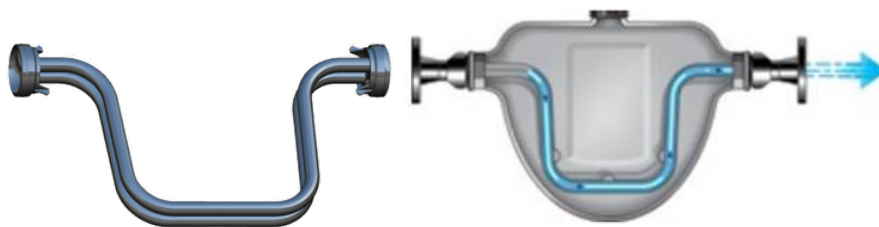


Figura 2.5: Detalhe da geometria do densitômetro.

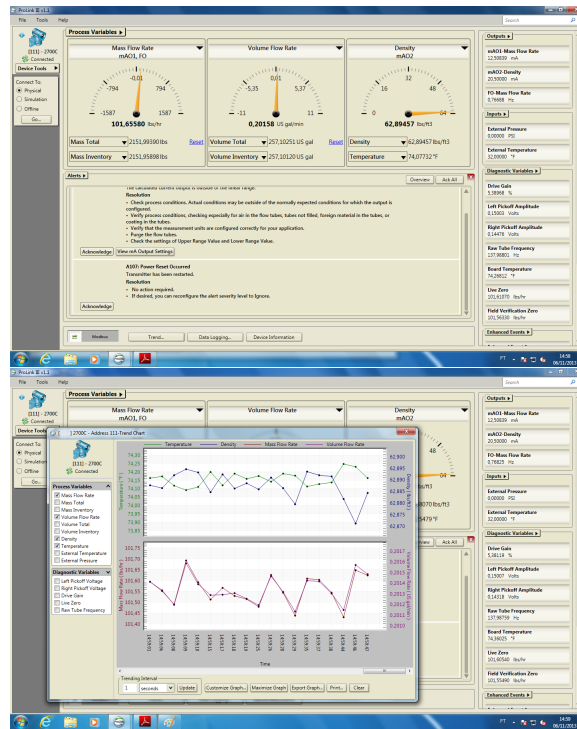


Figura 2.6: Interface do software de aquisição ProLink III.

2.2

Procedimento Experimental

O armazenamento dos fluidos de teste é feito em três reservatórios de acrílico.

Para a execução dos testes, o espaço anular é preenchido com o fluido a ser deslocado. A seguir a bomba de deslocamento positivo é acionada e o fluido deslocador começa a deslocar o fluido que se encontra no espaço anular.

Na saída do anular, o medidor de vazão encontra-se conectado ao transmissor MVD que permite a leitura dos dados e conexão com o computador. A eficiência de deslocamento será avaliada pela curva de densidade do fluido na saída do escoamento anular pelo volume de fluido bombeado durante o processo.

Os dados de vazão (\dot{V} [m³/s]), velocidade (\bar{v} [m/s]) e taxa de deformação característica ($\dot{\gamma}_c$ [1/s]) para os testes experimentais são apresentados na tabela 2.1

RPM	\dot{V} [m ³ /s]	\bar{v} [m/s]	$\dot{\gamma}_c$ [1/s]
830	2.00E-005	0.0281	12.3453
1980	4.71E-005	0.0659	29.0490

Tabela 2.1: Dados de entrada dos testes experimentais.

A taxa de deformação característica é utilizada para o cálculo da vis-

cosidade característica (η_c) dos fluidos não newtonianos. A eq.2-1 apresenta esse cálculo, onde \bar{v} é a velocidade média do escoamento e D_h é o diâmetro hidráulico.

$$\dot{\gamma}_c = \frac{8\bar{v}}{D_h} \quad (2-1)$$

O número de Reynolds é calculado a partir das propriedades do fluido 2 (deslocador).

$$Re = \frac{\rho_2 \bar{v} D_h}{\eta_c} \quad (2-2)$$

2.3

Análise dos resultados

Os resultados serão apresentados através da curva de ρ^* em função de V^* . A densidade adimensional ρ^* é definida pela eq.2-3, sendo ρ_{saida} a densidade medida pelo densitômetro na saída do anular, ρ_1 a densidade inicial do fluido que será deslocado e ρ_2 a densidade do fluido deslocador. O volume adimensional V^* (eq.2-4) é dado pela razão entre o volume de fluido bombeado na saída e o volume de um anular, que é igual a 0.000765 m^3 .

$$\rho^* = \frac{\rho_{saida} - \rho_1}{\rho_2 - \rho_1} \quad (2-3)$$

$$V^* = \frac{V_{bombeado}}{V_{anular}} \quad (2-4)$$

Para uma melhor comparação entre os testes, foram definidas as razões de densidade e viscosidade para cada par de fluidos. Assim, ρ_r é a razão de densidades (eq.2-5), μ_r é a razão de viscosidades para fluidos newtonianos (eq.2-6) e η_r é a razão de viscosidade para os fluidos não newtonianos (eq.2-8). O índice 2 se refere ao fluido deslocador e o 1 ao fluido deslocado.

$$\rho_r = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (2-5)$$

$$\mu_r = \frac{\mu_2}{\mu_1} \quad (2-6)$$

$$\eta_r = \frac{\eta_2}{\eta_1} \quad (2-7)$$

A tensão limite de escoamento adimensional (τ_y) para fluidos viscoplásticos foi definida a partir de uma tensão característica (τ_c) igual a $\tau_c = \eta_c \cdot \dot{\gamma}_c$, onde η_c é a viscosidade característica do fluido viscoplástico e $\dot{\gamma}_c$ é a taxa de deformação característica.

$$\tau_y^* = \frac{\tau_y}{\tau_c} \quad (2-8)$$

A fig.2.7 apresenta um esquema da geometria do escoamento anular estudado. O fluido 1 é referente ao fluido deslocado e o fluido 2 ao deslocador.

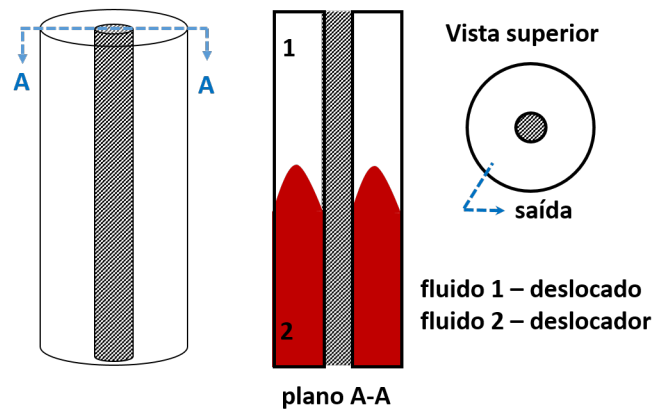


Figura 2.7: Esquema da geometria do experimento.

A eficiência de deslocamento ϵ é a área sob a curva do gráfico mostrado na fig.2.8. A eq.2-9 apresenta a integral equivalente a área sob a curva, onde \forall_b é o volume bombeado, \forall_t é o volume total e α_2 é a fração volumétrica do fluido deslocador.

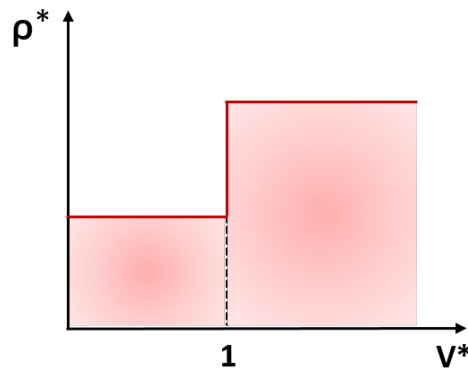


Figura 2.8: Eficiência de deslocamento.

$$\epsilon = 1 - \frac{1}{\forall_b} \int_{\forall_t} \alpha_2 d\forall \quad (2-9)$$

2.4

Fluidos de teste

Os fluidos escolhidos para os testes foram fluidos modelos com diferentes comportamentos, newtonianos, pseudoplásticos, viscoplásticos e tixotrópicos.

Duas soluções de glicerina e água, uma com 30% e outra com 60% de glicerina foram os fluidos newtonianos utilizados por possuírem densidade e viscosidade superior a água.

Os fluidos não newtonianos escolhidos foram goma xantana, Carbopol® e Laponita®.

A goma xantana é fluido pseudoplástico amplamente utilizado nas indústrias farmacêutica e alimentícia como espessante, estabilizante e emulsificante. Na indústria de óleo e gás é encontrada como aditivo em fluidos de perfuração base água, em colchão separador e também em casos de redução de arraste em escoamentos. O tempo de preparo da goma xantana é de um dia, pois após o preparo a mesma deve descansar por 24 horas. Além disso, ela deve ser utilizada em até um dia, para evitar alterações na sua reologia. As concentrações utilizadas nos testes foram 0.1% e 0.08% e não apresentam propriedades elásticas nessas proporções.

O Carbopol® 980 é um tipo de carbômero utilizado na indústria farmacêutica no preparo de shampoo, gel de cabelo, cremes e protetores solares por exemplo. É um fluido viscoplástico que será utilizado como modelo para a representação do fluido de perfuração. O tempo de preparo é superior ao da goma xantana, pois tem que ficar no misturador por cinco dias para obter homogeneizar e estabilizar, mas pode ser utilizado por um período maior de tempo. A concentração utilizada no experimento foi de 1%.

Por fim, a Laponita® é uma argila sintética, de comportamento tixotrópico utilizada em materiais orgânicos, cerâmicas e tintas. A Laponita® é preparada em um dia, e após o preparo fica sete dias descansando, podendo ser utilizada a partir do oitavo dia. A Laponita® é utilizada como modelo para representar a pasta de cimento gelificada. A concentração utilizada foi de 2%, menor concentração para obter-se a formação do gel e o comportamento tixotrópico.

O preparo dos fluidos é melhor detalhado no anexo I.

3

Metodologia Numérica

Neste capítulo serão apresentadas as equações governantes e os modelos constitutivos do problema estudado. A análise numérica será utilizada para complementar os resultados obtidos experimentalmente e também para a obtenção de resultados fora da faixa de operação do experimento.

3.1

Modelos constitutivos de viscosidade

Os fluidos não Newtonianos puramente viscosos são modelados pela equação de Fluido Newtoniano Generalizado, apresentada a seguir:

$$\boldsymbol{\tau} = \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma} \quad (3-1)$$

onde $\boldsymbol{\tau}$ é o tensor das tensões, $\eta(\dot{\gamma})$ é a viscosidade em função da taxa de deformação e $\dot{\gamma}$ é o tensor taxa de deformação. Existem diversas expressões na literatura para a função viscosidade, que descrevem os diferentes tipos de comportamento, tais como pseudoplástico, dilatante ou viscoplástico. O modelo mais conhecido e utilizado para representar a função viscosidade de fluidos não Newtonianos é o modelo de Potência (*Power-Law*) ou modelo de Ostwald e de Waele. A eq. 3-2 descreve este modelo onde η é a função viscosidade, K é o índice de consistência, $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação e n é o expoente *power-law*. Quando o valor do expoente n é menor do que 1 o fluido é pseudoplástico (*shear-thinning*), e para $n > 1$ o fluido é dilatante (*shear-thickening*) (32).

$$\eta = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (3-2)$$

Outro modelo que será utilizado no presente trabalho será o modelo de *Herschel-Bulkley*. Este modelo é utilizado para descrever o comportamento de fluidos viscoplásticos. A eq. 3-3 apresenta este modelo, onde η é a função viscosidade do fluido, τ_y é a tensão limite de escoamento, $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação, k é o índice de consistência e n é o expoente *power-law*.

$$\begin{cases} \eta = \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} + K\dot{\gamma}^{n-1}, & \text{se } \tau > \tau_y \\ \infty, & \tau < \tau_y. \end{cases} \quad (3-3)$$

3.2

Equações Governantes

O estudo desenvolvido envolve a solução de um escoamento multifásico, incompressível, transiente, isotérmico e laminar em três dimensões. Os fluidos possuem densidades constantes e podem ser newtonianos e não newtonianos. As equações que governam o problema são as equações de conservação de massa e de quantidade de movimento.

A equação de conservação de massa ou continuidade para a mistura é descrita pela eq.3-4.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3-4)$$

Como o escoamento é multifásico e o método que será utilizado é o VOF (*Volume of Fluid*) (33) é necessária a solução da equação de conservação de massa para cada fase (fluido), descrita pela eq. 3-5.

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3-5)$$

O VOF resolve um conjunto de equações de conservação de massa e obtém a fração de volume de cada fase α_j ao longo do domínio, que devem somar um em cada volume de controle. Assim, pode-se ter:

- $\alpha_i = 0$, a célula não contém a fase i ;
- $\alpha_i = 1$, a célula só contém a fase i;
- $0 < \alpha_i < 1$, a célula contém a interface entre os fluidos.

Nas equações acima α_i é fração volumétrica de cada fase, x_i são as coordenadas e u_i são os componentes do vetor velocidade. Para os casos analisados no presente trabalho estão presentes apenas dois fluidos. Assim, resolve-se a eq. 3-5 para um dos fluidos e a fração volumétrica do outro fluido é obtida pela seguinte equação de restrição:

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1 \quad (3-6)$$

Os campos das variáveis e propriedades são comuns às fases, e para um campo ϕ valem:

$$\phi = \alpha_2 \phi_2 + (1 - \alpha_2) \alpha_1. \quad (3-7)$$

A equação de quantidade de movimento é dada pela eq. 3-8,

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\eta \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3-8)$$

onde ρ é a densidade, u_i são os componentes do vetor velocidade, x_i são as coordenadas e η é a função viscosidade descrita anteriormente.

Utilizando os seguintes parâmetros adimensionais, as equações de conservação de massa e de quantidade de movimento podem ser reescritas na forma adimensional pelas eqs.3-9, 3-10 e 3-11:

$$u_i^* = \frac{u_i}{\bar{u}}, \quad x_i^* = \frac{x_i}{D_h}, \quad t^* = \frac{t\bar{u}}{D_h}, \quad P^* = \frac{P}{\rho g D_h} \quad e \quad \eta^* = \frac{\eta}{\eta_c}.$$

$$\frac{\partial u_i^*}{\partial x_i^*} = 0 \quad (3-9)$$

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t^*} + u_i \frac{\partial \alpha_i}{\partial x_j^*} = 0 \quad (3-10)$$

$$\frac{\partial u_i^*}{\partial t^*} + \frac{\partial u_i^* u_j^*}{\partial x_j^*} = \frac{1}{Fr^2} \left[\frac{\partial P^*}{\partial x_i^*} + 1 \right] + \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial x_i^*} \left[\eta^* \left[\frac{\partial u_i^*}{\partial x_j^*} + \frac{\partial u_j^*}{\partial x_i^*} \right] \right] \quad (3-11)$$

onde o número de Reynolds e o número de Froude são dados por:

$$Re = \frac{\rho \bar{u} D_h}{\eta_c} \quad e \quad Fr = \frac{\bar{u}}{\sqrt{g D_h}}$$

sendo ρ a densidade do fluido deslocador, \bar{u} é a velocidade média do escoamento, D_h é o diâmetro hidráulico, η_c é a viscosidade característica do fluido deslocador e g é a gravidade.

A solução das equações de conservação de massa e de quantidade de movimento são obtidas numericamente utilizando o *software* de código aberto OpenFOAM (Open Source Field Operation and Manipulation). Este código é baseado no método dos volumes finitos.

3.3

Método dos Volumes Finitos

A utilização de métodos numéricos em projetos de engenharia é de grande importância. Essa ferramenta permite a execução de projetos mais econômicos e eficientes. Em comparação com análises experimentais, as vantagens são o baixo custo para a realização de um conjunto de simulações, a velocidade na execução e a possibilidade de utilização de modelos reais. A indústria aeroespacial foi a primeira a utilizar ferramentas computacionais no desenvolvimento de aviões. Hoje em dia essas ferramentas são amplamente utilizadas na indústria automotiva, na engenharia química, na área biomédica entre outras.

As etapas que envolvem uma simulação são o pré-processamento, a solução e monitoramento das equações e o pós-processamento que é a análise dos resultados. A etapa de pré-processamento é a que exige maior cuidado e que irá garantir o sucesso do estudo numérico. Nesta etapa são definidas a geometria de interesse, geração de malha e a modelagem física, matemática e numérica do problema. Um exemplo da utilização de ferramentas numéricas em melhorias de produto é apresentada na fig.3.1. O estudo tinha como objetivo a melhora do sistema de resfriamento de motores elétricos (revista ANSYS Solutions - Fall 2005).

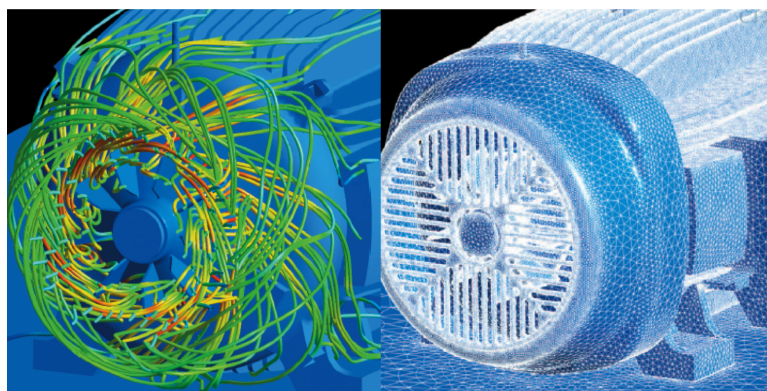


Figura 3.1: Estudo numérico realizado em motores elétricos (ANSYS Solutions - Fall 2005).

Os métodos numéricos mais utilizados são diferenças finitas, volumes finitos e elementos finitos.

O método das diferenças finitas utiliza formulação com série de Taylor para as equações de discretização. O método dos volumes finitos deriva do método das diferenças finitas e utiliza a forma diferencial das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia. A solução é obtida integrando as equações de conservação em um volume de controle conhecido (33). Em problemas multifásicos um sistema de equações é resolvido para cada

fase, com as relações interfacias das mesmas. E o método dos elementos finitos a discretização ocorre a partir das funções base e o domínio é dividido em elementos definidos por nós. O tipo de elemento mais comum é o lagrangeano.

3.4

OpenFOAM

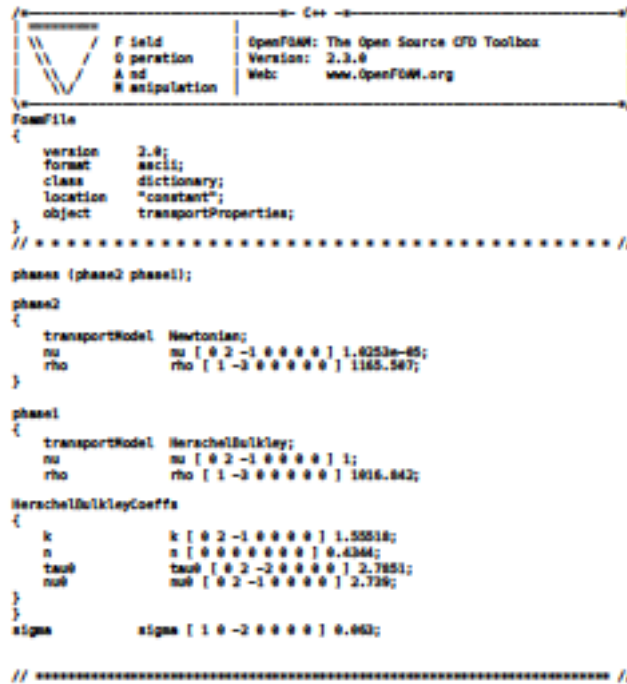
O *software* OpenFOAM surgiu em 1993 como FOAM, no Imperial College em Londres como uma colaboração entre Henry Weller and Hrvoje Jasak. O objetivo era ter uma ferramenta para fazer operações com campos tensoriais. Em 2004, o *software* teve seu código liberado, se tornando domínio público através da licença GLP (Gnu Public License) e assim passou a ser chamado de OpenFOAM. Com isso, foi possível a utilização do *solver* por um maior número de pessoas que precisavam ir além do que os pacotes comerciais ofereciam, já que o mesmo permite que o usuário crie seu próprio *solver* para problemas de interesse. O OpenFOAM é composto por bibliotecas programadas em C++, que utilizam a técnica orientado-objeto, facilitando a criação de novas subrotinas.

As aplicações podem ser divididas em *solvers* e *utilities*. Assim um amplo número de aplicações é coberto pelo OpenFOAM, desde um escoamento potencial (simpleFOAM), transiente laminar (icoFOAM) até modelos mais complexos como escoamentos multifásicos (interFOAM) entre outros.

O OpenFOAM funciona a partir de três diretórios principais:

- 0
- system
- constant

esses três diretórios encontram-se dentro da pasta principal que tem nome do caso. O diretório *0* contém os campos físicos, condições de contorno e inicialização do problema. O diretório *constant* contém as propriedades físicas do problema (*transportProperties*), os dados de geometria e malhas (*blockMesh*) que se encontra na subpasta *polyMesh*. O diretório *system* é a pasta que contém todo o setup numérico e de monitoramento do problema, que são definidos pelos três arquivos principais, o *controlDict*, *fvSolution* e *fvScheme*. O *controlDict* contém as informações de tempo de simulação, passo de tempo, controla o intervalo para salvar dados, o número de Courant, etc. O *fvScheme* é onde os métodos de discretização são escolhidos. E o *fvSolution* onde são definidos o algoritmo de acoplamento pressão-velocidade, tolerâncias e os métodos de solução das equações. A fig.3.2 apresenta um exemplo do arquivo *transportProperties*.



```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "constant";
    object       transportProperties;
}
// *****

phases (phase2 phase1);

phase2
{
    transportModel Newtonian;
    mu [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 1.0253e-05;
    rho [ 1 -3 0 0 0 0 0 ] 1185.547;
}

phase1
{
    transportModel HerschelBulkley;
    mu [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 1;
    rho [ 1 -3 0 0 0 0 0 ] 1016.042;

    HerschelBulkleyCoeffs
    {
        k [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 1.55518;
        n [ 0 0 0 0 0 0 0 ] 0.4366;
        tau0 [ 0 2 -3 0 0 0 0 ] 2.7851;
        mu0 [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 2.738;
    }

    sigma [ 1 0 -2 0 0 0 0 ] 0.042;
}
// *****

```

Figura 3.2: Exemplo do arquivo *transportProperties*.

O solver utilizado nas simulações do presente trabalho foi o *interFoam*. Este solver é utilizado para a solução de problemas multifásicos de dois fluidos incompressíveis, isotérmicos e imiscíveis utilizando o esquema VOF para contabilizar a interface entre os fluidos (34).

3.4.1

Modelos constitutivos de Viscosidade

O OpenFOAM já tem implementado diversos modelos de viscosidade para fluidos não newtonianos. A definição do modelo utilizado é feita no arquivo *transportProperties*. Dentre eles estão os modelos Newtoniano, Bird-Carreau, Cross Power Law, Power-Law, Herschel-Bulkley e Casson. É importante ressaltar que o software trabalha com a viscosidade cinemática dos fluidos.

Nas simulações realizadas no presente trabalho os modelos utilizados foram newtoniano, Power Law e Herschel-Bulkley.

No modelo Power Law a função viscosidade é limitada por valores máximo e mínimos de acordo com a taxa de deformação (eq.3-12)

$$\nu = K\dot{\gamma}^{n-1}, \quad \nu_{min} \leq \nu \leq \nu_{max}. \quad (3-12)$$

O modelo de Herschel-Bulkley, para baixas taxas de deformação, o fluido é modelado como um fluido muito viscoso (ν_0). Para outras taxas de deformações o valor mínimo é considerado utilizando a eq.3-13:

$$\nu = \min(\nu_0, \tau_y/\dot{\gamma} + K\dot{\gamma}^{n-1}). \quad (3-13)$$

3.4.2

Condições de Contorno

No OpenFOAM as condições de contorno são definidas no diretório 0. Neste diretório estão os arquivos `alpha.phase2`, `U` e `p_rgh`. Para cada fronteira são especificadas as equações equivalentes de condição de contorno.

A condição de contorno nas paredes interna e externa do anular é de não deslizamento definida pela equação:

$$u_i = 0. \quad (3-14)$$

Para a fronteira da entrada a condição é de velocidade uniforme na direção axial:

$$u_i = \bar{u}. \quad (3-15)$$

Para a fronteira da saída a condição é de escoamento desenvolvido:

$$\frac{u_i}{\partial x_i} = 0. \quad (3-16)$$

No OpenFOAM essas condições foram definidas utilizando as subrotinas de *fixedValue* que restringe um valor para a fronteira e também serve de base para a definição de condições de contorno mais complexas e *zeroGradient* que aplica a condição de gradiente nulo para as fronteiras.

3.4.3

Esquemas numéricos

Os esquemas numéricos para os termos das equações governantes como gradientes, divergentes, lapacianos etc, disponíveis no OpenFOAM estão contidos no arquivo *fvSchemes*. Este dicionário é subdividido em:

- *interpolationSchemes* em que a interpolação de valores é feita ponto a ponto. Dentre algumas opções disponíveis estão *linear*, *limitedLinear*, *MUSCL*, *vanLeer* etc. O esquema utilizado foi o *linear*.
- *snGradSchemes* é o componente do gradiente normal a face da célula.
- *gradSchemes* é o operador gradiente das equações. Algumas opções são *Gauss*, *leastSquares*, *fourth*. Nas simulações foi utilizado *Gauss linear*.
- *laplacianSchemes* é o operador difusão (laplaciano). Nesta opção esquema de integração do termo de difusão é *Gauss*.
- *divSchemes* é o operador divergente ou termo convectivo. O esquema utilizado foi *Gauss linear*.

e PIMPLE que é uma combinação do PISO com o SIMPLE mais eficiente que o segundo. Nas simulações deste trabalho foi utilizado o algoritmo PISO para o acoplamento pressão-velocidade.

3.5

Teste de Malhas

No teste de malhas foram testadas três malhas estruturadas com refinamentos distintos. As malhas foram geradas utilizando *software* ANSYS ICEM. O modelo criado é tridimensional. A primeira malha grosseira com 112896 elementos, a segunda 25% mais refinada de 349272 elementos e uma com um refino de 75% com 683316 elementos.

O caso simulado no teste de malhas foi etilenoglicol deslocando água para um $Re=70$, tubos concêntricos. Este caso foi escolhido como caso base para a validação da metodologia numérica e para o teste de malhas por ser um caso em que o resultado é um *plug*. O escoamento é laminar e transiente. As condições de contorno usadas foram parede sem deslizamento para as paredes interna e externa do anular, velocidade uniforme na entrada e escoamento desenvolvido na saída.

A fig.3.4 apresenta o perfil de velocidade em função do diâmetro para um tempo igual a 2s. O resultado obtido para as três malhas mostra que as malhas 2 e 3 tem resultados similares, sendo a malha 3 a escolhida para as simulações numéricas.

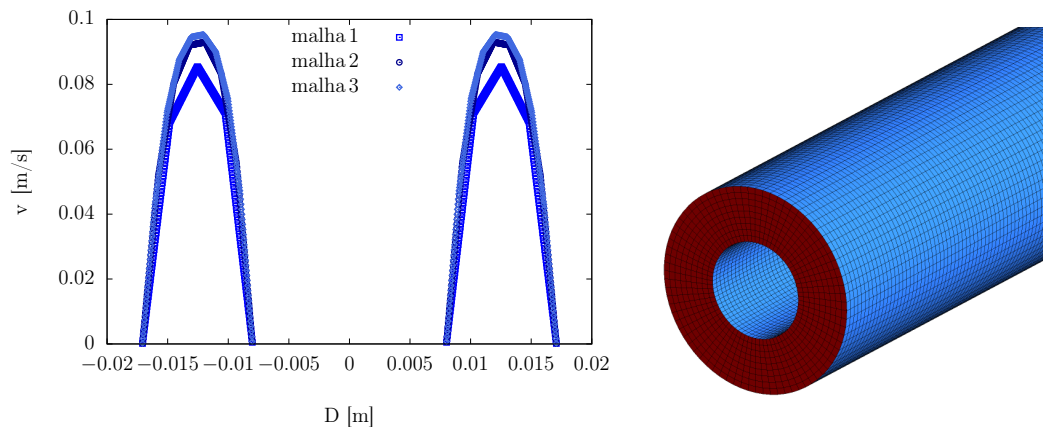


Figura 3.4: Teste de malhas e domínio computacional 3D.

3.6

Validação do procedimento numérico - OpenFOAM x Fluent x Experimento

Utilizando o mesmo caso do teste de malhas, uma comparação entre os resultados obtidos utilizando o *software* ANSYS Fluent e o OpenFOAM foi

realizado. Para um melhor entendimento o resultado experimental também foi analisado.

A comparação experimental e numérica do deslocamento de água por etilenoglicol é apresentada na fig.3.5. O gráfico mostra a densidade adimensional da mistura de fluido na saída em função do volume adimensional de fluido bombeado. A partir deste gráfico é possível avaliar a eficiência de deslocamento dos fluidos. As razões de densidade e de viscosidade para este caso são $\rho^* = 1.11$ e $\mu^* = 19.94$. Neste teste temos a formação de um *plug* (isto é, interface plana entre os fluidos), com 100% de eficiência de deslocamento para os dois números de Re escolhidos. As simulações numéricas mostram uma boa concordância entre os testes numéricos com os dois códigos e os resultados experimentais. Este teste foi realizado para validar a comparação numérica entre os *softwares* e validar também as simulações e o experimento.

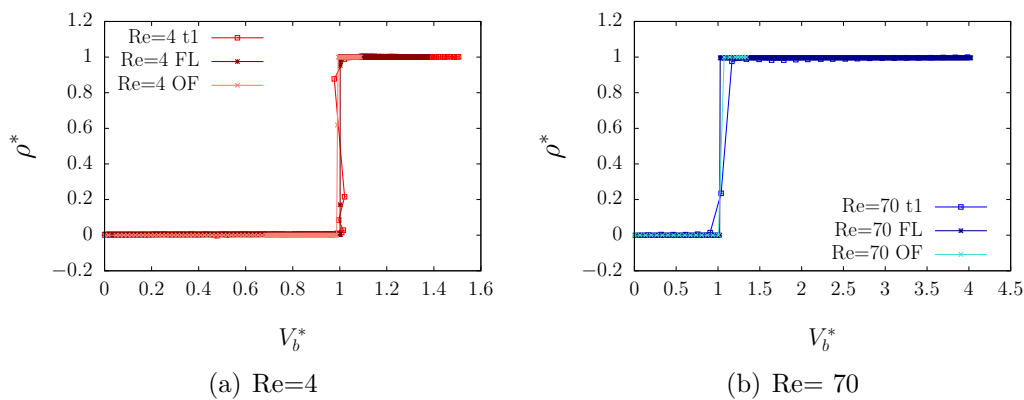


Figura 3.5: Etilenoglicol deslocando água para $Re=4$ e $Re=70$. Comparação experimental e numérica (ANSYS Fluent e OpenFOAM).

3.7

Influência da tensão interfacial nos resultados

Nas primeiras comparações qualitativas realizadas entre os resultados obtidos experimental e numericamente não estavam coerentes. Uma possível explicação para a diferença era a influência da tensão interfacial no problema. Para avaliar essa influência o número de capilaridade (Ca) foi calculado. O número de capilaridade é definido pela razão das forças viscosas e a tensão superficial na interface das fases

$$Ca = \frac{\mu \bar{v}}{\sigma} \quad (3-17)$$

onde μ é a viscosidade do fluido, \bar{v} é a velocidade característica e σ é a tensão superficial. Para que as forças viscosas dominem é necessário que $Ca \gg 1$.

O caso escolhido para esse teste foi óleo de soja deslocando a água para $Re=1226$. O número de Ca para esse caso foi de 0.018. O resultado mostra que existe uma diferença entre a interface formada quando a tensão superficial é levada em conta (fig.3.6). A fig.4.17(a) mostra o resultado quando a tensão superficial é considerada. Este formato de interface é o mesmo observado no caso experimental. Quando a tensão não é considerada (fig.3.6(b)) ocorre a formação de uma interface pontiaguda.

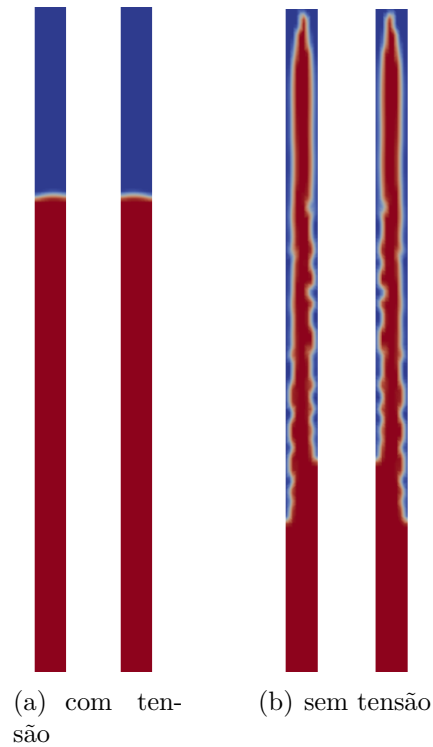


Figura 3.6: Teste tensão interfacial.

Após esse teste, a tensão superficial foi considerada nas simulações.

4

Resultados

A seguir serão apresentados os resultados experimentais e numérico obtidos no presente trabalho.

Primeiramente serão apresentados os resultados experimentais com pares de fluidos newtonianos. O objetivo desses testes foi a validação da seção de testes experimentais.

Para os casos newtonianos foram selecionados um par de fluidos que formasse interface plana para facilitar a validação. Os pares de fluidos escolhidos foram água deslocando óleo soya e etilenoglicol deslocando água. Em seguida foram realizados experimentos com fluidos não newtonianos.

Os fluidos não newtonianos escolhidos foram goma xantana em duas concentrações (0.1% e 0.08%), Carbopol® 0.1% e Laponita® 2%. A goma xantana é um fluido pseudoplástico, o Carbopol® é um fluido viscoplástico e a Laponita® é um fluido tixotrópico. Assim, a análise do processo de deslocamento usando esses três fluidos permitirá obter a influência dos diferentes parâmetros/comportamento reológicos no processo de deslocamento.

Todos os testes experimentais foram realizados para duas vazões com configurações de geometria de poço concêntrica e excêntrica (75%) em posições vertical e inclinada (45°). Os pares de fluidos são miscíveis, no entanto a difusão entre as fases pode ser considerada desprezível pois o comprimento do anular é pequeno, e portanto o tempo de residência no interior do anular é também bastante pequeno.

As simulações numéricas realizadas para fluidos pseudoplásticos e viscoplásticos, visando analisar situações em outras faixas de parâmetros como o efeito da razão de densidades e tensão limite de escoamento dos fluidos. Além disso, foi investigado o deslocamento de um fluido viscoplástico por outro fluido também viscoplástico.

4.1

Resultados Experimentais

4.1.1

Casos newtonianos: etilenoglicol deslocando água

A validação das simulações numéricas foi realizada utilizando um par de fluidos newtonianos. O par de fluidos escolhido possui uma razão de viscosidade alta e razão de densidade próxima a 1. O objetivo era obter um deslocamento perfeito através da formação de um *plug*. Os fluidos escolhidos foram etilenoglicol como deslocador e água como deslocado. A tabela 4.1 apresenta os valores de densidade e viscosidade para este par de fluidos.

Fluidos	ρ [kg/m ³]	μ [Pa.s]
água	996.5845	0.001
etilenoglicol	1109.6	0.01994

Tabela 4.1: Propriedades da água e do etilenoglicol.

Deslocado	Deslocador	Conc/Exc	Vert/Incl	Re	ρ_r	μ_r	ϵ_f
água	etilenoglicol	concêntrico	vertical	4	1.11	19.94	99%
		excêntrico 75%	vertical	4	1.11	19.94	98%
		excêntrico 75%	inclinado 45°	4	1.11	19.94	96%
		concêntrico	vertical	70	1.11	19.94	99%
		concêntrico	inclinado 45°	70	1.11	19.94	97%
		excêntrico 75%	vertical	70	1.11	19.94	97%
		excêntrico 75%	inclinado 45°	70	1.11	19.94	96%

Tabela 4.2: Casos experimentais estudados.

Foram escolhidas duas vazões para os testes de validação. Essas vazões são as maiores vazões permitidas pela bomba e equivalem a um número de Reynolds de 4 e 70. Foram testados configurações concêntrica, excêntrica, vertical e inclinado. A tabela 4.2 apresenta os resultados experimentais da eficiência de deslocamento para os casos analisados.

A fig.4.1 apresenta a comparação experimental e numérica do deslocamento de água por etilenoglicol. A razão de densidade e de viscosidade para este caso são $\rho^* = 1.11$ e $\mu^* = 19.94$, respectivamente. Neste teste temos a formação de um plug, com 100% de eficiência de deslocamento. As simulações numéricas realizadas com os *softwares* ANSYS Fluent e OpenFOAM mostram uma boa concordância entre os testes numéricos dos dois códigos e os resultados experimentais. Este teste foi realizado para validar a comparação numérica entre os *softwares*.

Comparando os resultados obtidos para os dois pares de fluidos newtonianos, a melhor eficiência de deslocamento é para o caso concêntrico e vertical

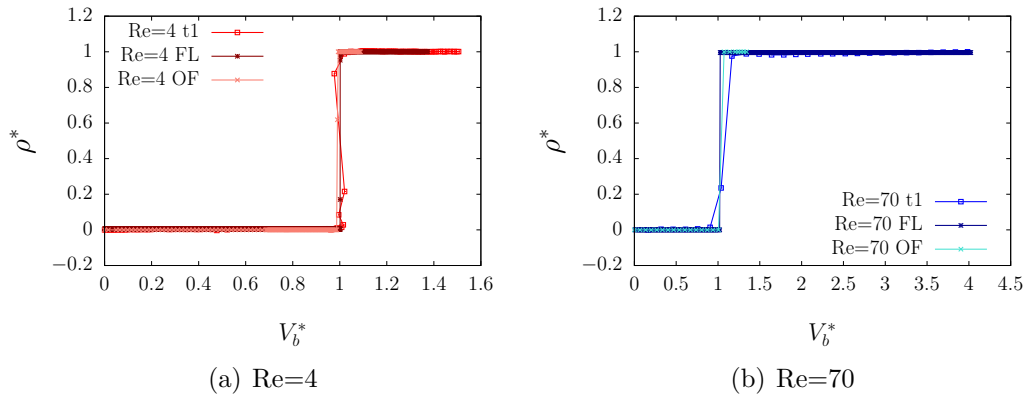


Figura 4.1: Etilenoglicol deslocando água para $Re=4$ e $Re=70$. Comparação experimental e numérica.

e o pior excêntrico inclinado. A inclinação gera uma assimetria no escoamento, e faz com que o fluido mais denso escoe pelas regiões inferiores, formando um canal de escoamento nessa região e consequentemente reduzindo a eficiência de deslocamento. A excentricidade também ocasiona perda de simetria e a redução na eficiência. Quando o fluido mais viscoso empurra o menos viscoso, a interface entre os fluidos é a mais plana e ocasionando o escoamento mais eficiente.

4.2

Resultados Experimentais

4.2.1

Casos newtonianos: água deslocando óleo soya

O deslocamento do óleo soya pela água foi realizado para duas vazões e diferentes configurações de geometria de poço. As propriedades dos fluidos são apresentadas na tabela 4.3. As razões de densidade (ρ^*) e viscosidade (μ^*) são respectivamente 1.086 e 0.02.

Fluidos	ρ [kg/m ³]	μ [Pa.s]
água	996.5845	0.001
óleo soya	917.437	0.05117

Tabela 4.3: Propriedades da água e do óleo soya.

A comparação numérica utilizando o *software* OpenFOAM para água deslocando óleo soya para os Re iguais a 532 e 1226 é apresentada na fig.4.2. Os resultados comparam o deslocamento para poços concêntricos e excêntricos na posição vertical. Para o par de fluidos newtonianos escolhido, o aumento do Re acarreta em um aumento da eficiência de deslocamento em todas as

Deslocado	Deslocador	Conc/Exc	Vert/Incl	Re	ρ_r	μ_r	ϵ_f
óleo soya	água	concêntrico	vertical	532	1.09	0.02	95%
		concêntrico	inclinado 45°	532	1.09	0.02	89%
		excêntrico 75%	vertical	532	1.09	0.02	91%
		concêntrico	vertical	1226	1.09	0.02	99%
		concêntrico	inclinado 45°	1226	1.09	0.02	92%
		excêntrico 75%	vertical	1226	1.09	0.02	91%

Tabela 4.4: Casos experimentais estudados.

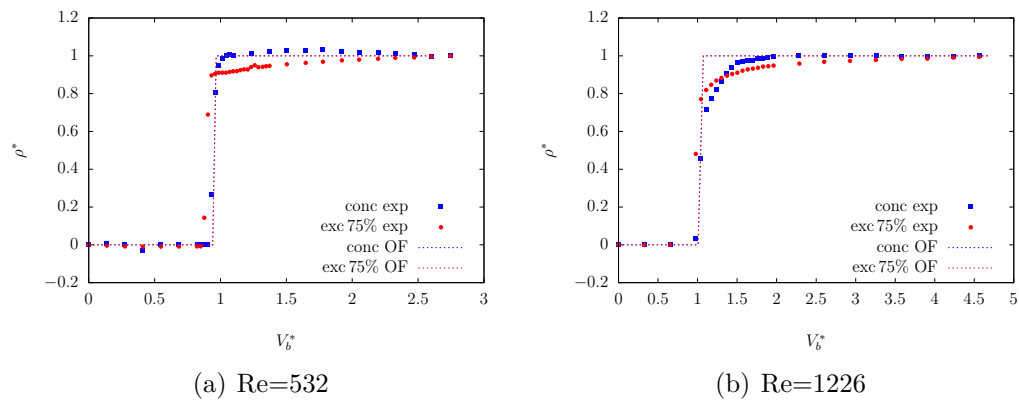


Figura 4.2: Água deslocando óleo soya para Re=532 e Re=1226.

geometrias de poço. Ao comparar o efeito da geometria de poço para um mesmo Re, os casos excêntrico e concêntrico inclinado tem uma queda na eficiência de deslocamento. Para o anular inclinado, o fluido mais denso, neste caso a água (fluido deslocador) tende a ocupar as regiões inferiores prejudicando o deslocamento. Da mesma forma a excentricidade gera a perda de simetria e consequentemente menores eficiências de deslocamento. A pequena diferença entre o formato das curvas experimental e numérica ocorre devido a forma da aquisição dos dados experimentais na saída do experimento, pois ocorre uma mistura dos fluidos no interior do densitômetro e nas simulações a aquisição dos resultados são realizadas diretamente na saída do anular. Qualitativamente os resultados experimental e numérico estão de acordo.

4.2.2
Casos não newtonianos: propriedades dos fluidos deslocadores

Nas próximas seções são apresentados os resultados experimentais e numéricos onde um dos fluidos considerados é não newtoniano. Para o deslocamento dos fluidos não newtonianos foram utilizadas duas soluções de glicerina, uma mais viscosa de concentração igual a 60% e uma menos viscosa de 30%. A tabela 4.5 apresenta os valores de densidade, viscosidade dinâmica e viscosidade cinemática para as soluções de glicerina

em água de 30% e 60% de glicerina respectivamente.

Fluidos	ρ [kg/m ³]	μ [Pa.s]	ν [m ² /s]
glicerina 30%	1071.9	0.00225	2.09908e-6
glicerina 60%	1163.6	0.01195	1.0267e-5

Tabela 4.5: Propriedades das soluções de glicerina de 30% e 60%.

4.2.3

Fluido pseudoplástico

Foram preparadas goma xantana em duas concentrações, uma primeira de 0.1% e uma segunda de 0.08%. A goma xantana é um fluido com comportamento reológico pseudoplástico. A densidade da goma xantana é igual a da água ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$). A reologia da goma xantana foi medida no laboratório, utilizando o reômetro AR-G2. A faixa de taxa de deformação utilizada no teste está de acordo com a faixa utilizada no experimento. A fig.4.3 apresenta a curva de tensão por taxa de deformação para os fluidos. A goma xantana de 0.1% é mais viscosa que a goma xantana de 0.08%.

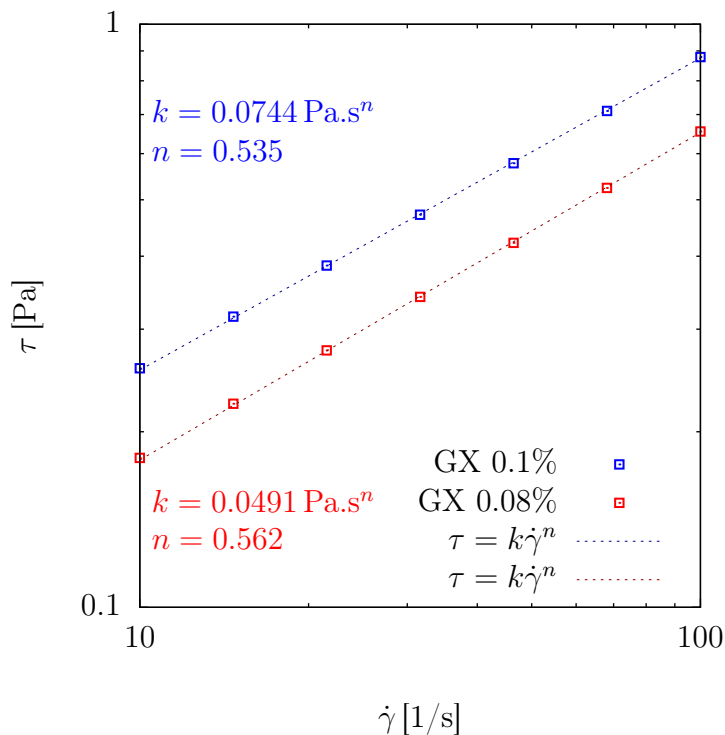


Figura 4.3: *Flow curve* para goma xantana de 0.1% e 0.08%.

Os parâmetros reológicos foram obtidos utilizando o modelo de viscosidade *Power-Law*, dado por $\eta = k\dot{\gamma}^{n-1}$. A tabela 4.6 apresenta esses parâmetros para as duas concentrações de goma xantana.

Fluidos	ρ [kg/m ³]	k [Pa.s ⁿ]	n
GX 0.1%	1000	0.11972	0.50342
GX 0.08%	1000	0.04487	0.60095

Tabela 4.6: Propriedades da goma xantana de 0.1% e 0.08%.

Nesta etapa a eficiência de deslocamento de fluidos sem tensão limite de escoamento foi investigada.

A tabela 4.7 mostra um resumo de todos os casos estudados. Os testes foram realizados para duas soluções de glicerina (30% e 60%) deslocando goma xantana de concentrações de 0.1% e 0.08%. As geometrias utilizadas foram concêntrica e excêntrica nas posições vertical e inclinado em 45°. Duas vazões foram consideradas na maioria dos casos. Na tabela são apresentados o par de fluidos do teste, geometria do poço, posição, número de Re, razão de densidades e viscosidade (ρ_r e η_r) e eficiência de descalocamento (ϵ_f).

Os casos inversos (goma xantana 0.1% deslocando as soluções de 30% e 60%) foram realizados apenas para o Re=77, correspondente a maior vazão da bomba.

Com relação a razão de densidades, pode-se observar que quando o fluido deslocador é menos denso que o fluido deslocado ($\rho_r < 1$) as eficiências são menores, isto porque a força gravitacional atua no sentido de mover o fluido deslocado para regiões inferiores e o deslocador para as regiões superiores, gerando interfaces mais pontiagudas e eficiências menores.

O efeito da razão de viscosidades também pode ser observado. Como nos casos newtonianos, o aumento da razão de viscosidades leva a interfaces mais planas e eficiências maiores. Vale ressaltar que nestes casos, a variação do número de Reynolds, que implica na variação das velocidades e taxas de deformação do escoamento, leva a alteração nas razões de viscosidades.

Finalmente, é novamente observado a redução da eficiência com a excêntricidade e inclinação do anular, devido a perda de simetria que ocasiona a formação de interfaces mais pontiagudas.

A fig.4.4 apresenta uma comparação do deslocamento dos fluidos no caso experimental e numérico. Neste teste a goma xantana 0.1% é deslocada pela solução de glicerina de 60% para um número de Re=49. Os resultados obtidos mostram que no caso experimental ocorre uma pequena difusão na interface entre os dois fluidos (4.4(a)), no entanto essa difusão é desprezada devido ao comprimento curto do anular. No caso numérico a interface encontra-se mais plana (4.4(b)). É importante ressaltar que nas simulações numéricas os fluidos são considerados imiscíveis, isto é a difusão entre os fluidos é nula. Os resultados numérico e experimental, nesta análise qualitativa, estão em concordância.

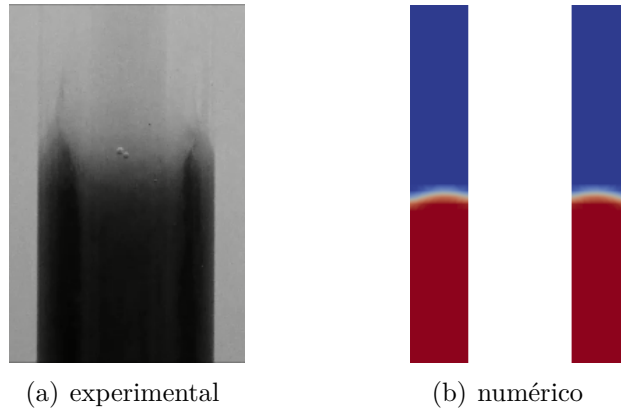
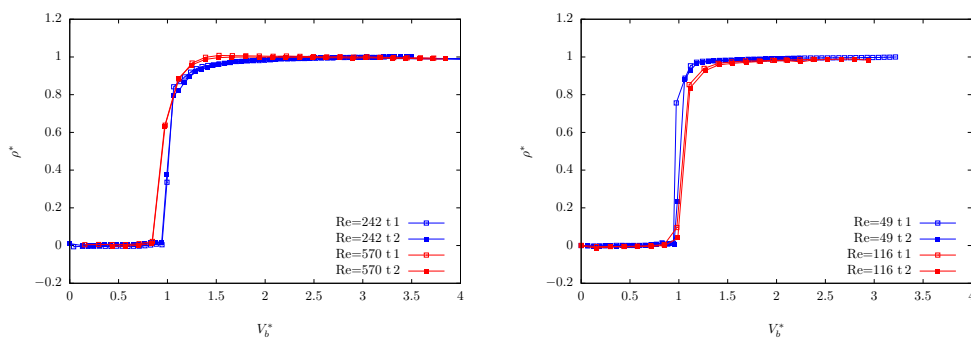


Figura 4.4: Escoamento da solução de glicerina 60% deslocando goma xantana 0.1% para $Re=49$.

A influência do número de Re no deslocamento dos fluidos para configuração concêntrica e vertical é apresentado na fig.4.5. A fig.4.5(a) mostra o deslocamento da goma xantana 0.1% pela glicerina de 30% para os números de Re iguais a 242 e 570. Note que para $Re=242$ a eficiência de deslocamento é 98.53% e para $Re=570$ igual a 97.52%. Já para o caso em que a glicerina 60% é o fluido deslocador (fig.4.5(b)), a maior eficiência é obtida com o maior Re . Para $Re=49$ a eficiência é de 96.44% e para $Re=116$ é de 98.77%. Nestas situações, a variação do número de Re implica em variação da razão de viscosidades, pois o fluido deslocado (goma xantana) é pseudoplástico. Assim, observa-se que para os casos que as razões de viscosidade eram bem menores do que 1 (números de Reynolds mais elevados), observou-se uma pequena redução da eficiência com o aumento do Re (e de η_r). Porém, nas situações em que $\eta_r \approx 1$ a eficiência aumentou com Re e η_r similar aos casos newtonianos. As razões de densidades e viscosidades para os quatro casos estudados mostram que a maior eficiência ocorre para o caso da glicerina de 60% com o maior Re , onde tem-se as maiores razões de densidade e viscosidade.



(a) $\rho_r = 1.072$ para $\eta_r = 0.0973$ e 0.1448

(b) $\rho_r = 1.164$ para $\eta_r = 0.5168$ e 0.7694

Figura 4.5: Influência do número de Re - caso concêntrico vertical.

O mesmo estudo da influência do número de Re foi realizado para configuração de poço com 75% de excentricidade e vertical (fig.4.6). As razões de densidade e viscosidade bem como o número de Re são os mesmos do caso concêntrico. Os gráficos da fig.4.6 apresentam o deslocamento da goma xantana 0.1% pela glicerina de 30% para Re iguais a 242 e 570 e pela glicerina de 60%, respectivamente. Um comportamento similar é observado para os dois fluidos deslocadores. Pode-se concluir que o comportamento do caso excêntrico é similar ao do caso concêntrico, no entanto ao comparar os casos concêntricos e excêntricos, uma melhor eficiência de deslocamento é obtida no primeiro, similar ao caso newtoniano. Aqui novamente, a excentricidade gera assimetria e a formação da interfaces mais pontiagudas, reduzindo a eficiência do processo de deslocamento.

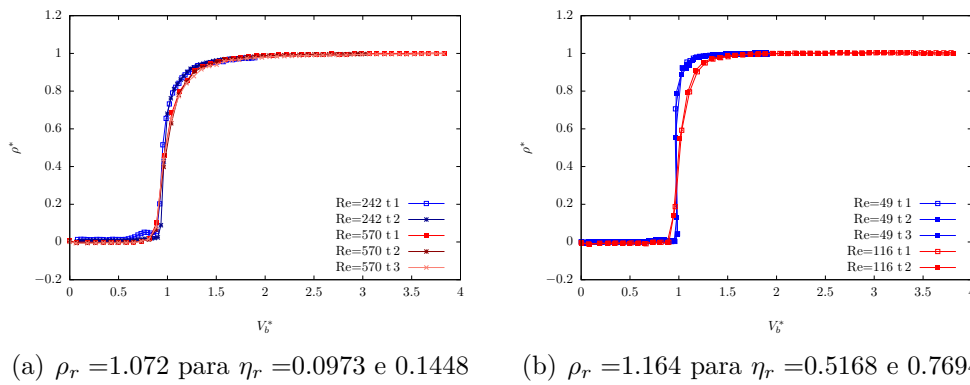


Figura 4.6: Influência do número de Re - caso excêntrico vertical.

O caso glicerina 60% deslocando a goma xantana 0.1% para Re=116 foi utilizado para analisar a eficiência de deslocamento quando o poço está inclinado (fig.4.7). As razões de densidade e viscosidade para estes casos são 1.164 e 0.7694 respectivamente. A fig.4.7(a) apresenta os testes concêntrico e excêntrico na posição vertical e a fig.4.7(b) inclinado em 45° . A eficiência de deslocamento é menor nos casos inclinados, sendo o excêntrico inclinado o que possui a menor eficiência 95.53%. Esta redução na eficiência é devido ao efeito da força gravitacional, que proporciona a formação de interfaces pontiagudas devido a tendência do fluido mais pesado escoar para as regiões inferiores.

O caso inverso, goma xantana 0.1% deslocando as duas concentrações de glicerina também foi estudado. Foram realizados testes com as geometrias concêntrica e excêntrica na posição vertical para um número de Re=77. A fig.4.8(a) apresenta o resultado da goma xantana 0.1% deslocando glicerina de 30% para configurações concêntrica e excêntrica. A eficiência de deslocamento para os casos é 89.52% e 82.82% respectivamente. Considerando a glicerina

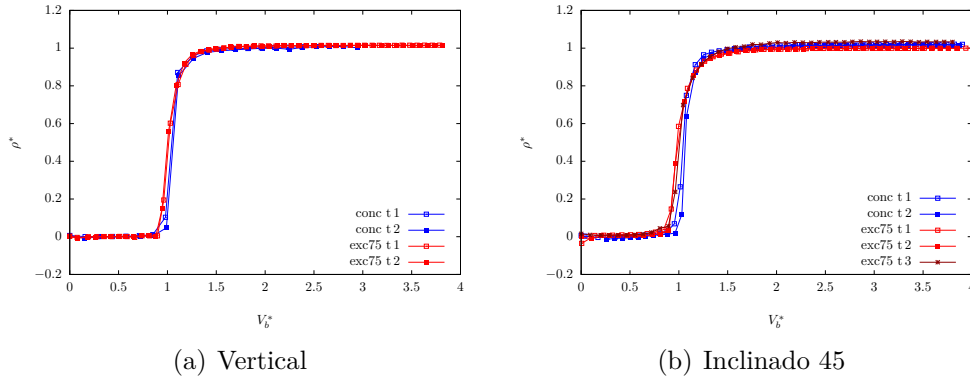


Figura 4.7: Glicerina 60% deslocando GX 0.1% - $Re = 116$

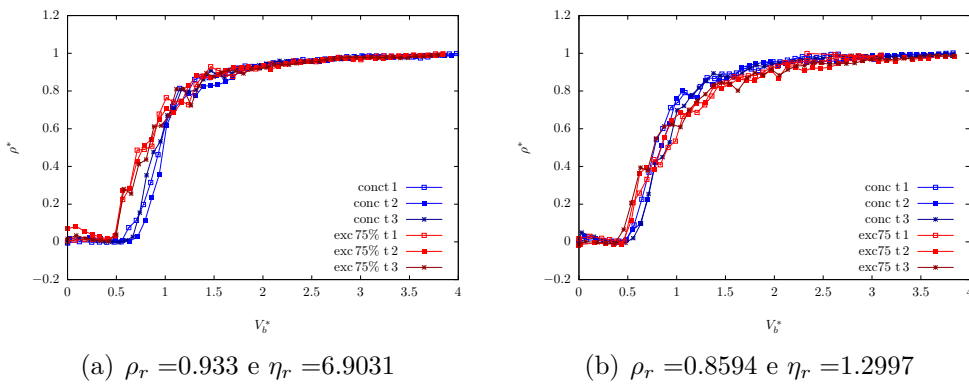


Figura 4.8: Goma xantana 0.1% deslocando as duas concentrações de glicerina.

de 60% como fluido deslocado, essa eficiência cai para 85.57% e 81.08% (fig.4.8(b)).

O deslocamento experimental é apresentado qualitativamente na fig.4.9, para o caso da glicerina de 60% deslocada pela goma xantana 0.1% com 75% de excentricidade e vertical. Observa-se que ao final do processo a glicerina de 60% foi totalmente removida. O gráfico da goma xantana 0.1% deslocando a glicerina 60% mostra que são necessários três volumes bombeados para a remoção completa da glicerina.

Nestas situações, a razão de viscosidades é maior do que 1 sempre, e a razão de densidades menor do que um, isto é, situação inversa dos casos analisados anteriormente. A primeira observação é que as eficiências obtidas são menores do que os casos anteriores. Este efeito é devido a ação da força gravitacional principalmente, que em todos os casos age contrária ao movimento, gerando instabilidades e interfaces não planas inclusive no caso vertical. Nos casos excêntrico e inclinado este efeito é ainda mais pronunciado e as eficiências são ainda menores.

Uma segunda concentração de goma xantana igual a 0.08% foi testada também. Esta goma é menos viscosa que a primeira. As propriedades são

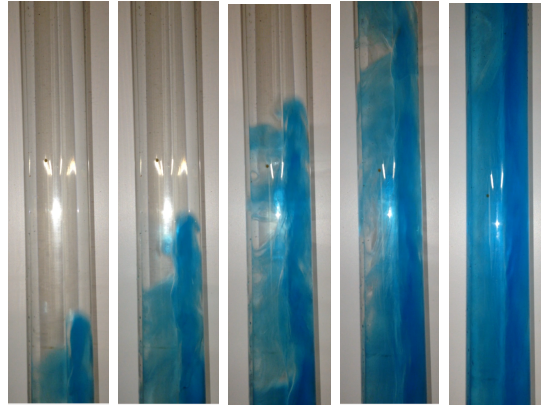


Figura 4.9: Goma xantana 0.1% deslocando glicerina 60% - $Re=77$

apresentadas na tabela 4.6. Como fluido deslocador foram utilizadas soluções de glicerina com concentrações de 30% e 60%. A solução de glicerina 30% foi utilizada somente nos casos verticais. O estudo completo foi realizado para a glicerina de 60%.

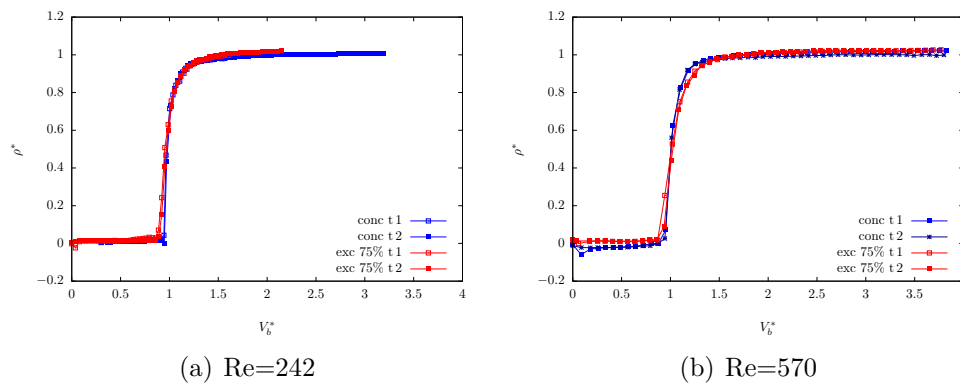


Figura 4.10: Glicerina 30% deslocando goma xantana 0.08%.

A fig.4.10 apresenta o deslocamento da goma xantana 0.08% pela glicerina 30%, concêntrico e excêntrico para número de Re igual a 242. A eficiência de deslocamento é 97.13% para o caso concêntrico e 94.61% para o excêntrico. O resultado para $Re=570$ é apresentado na fig.4.10(b). A eficiência de deslocamento é de 99.30% para o caso concêntrico e 98.20% para o excêntrico.

Novamente, o aumento do número de Re leva a um aumento na eficiência do processo. Da mesma forma, a assimetria causada pela excentricidade e pelos efeitos da força gravitacional nos casos inclinados reduzem a eficiência devido as instabilidades geradas na interface entre os fluidos.

Para o caso da glicerina 60% deslocando a goma xantana 0.08%, uma comparação em relação ao efeito da inclinação foi realizada. As figs.4.11(a) e 4.11(b) apresentam esses resultados. As razões tanto de densidade e viscosidade

são aproximadamente 1 e a eficiência de deslocamento para os casos ficaram entre 99% e 97%.

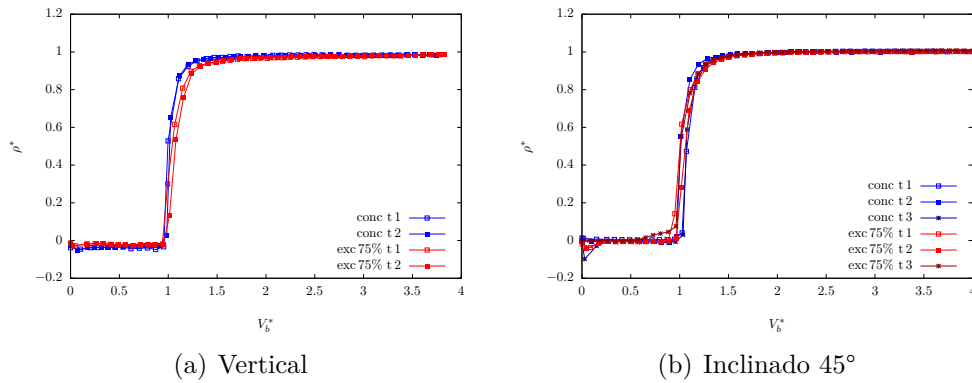


Figura 4.11: Glicerina 60% deslocando goma xantana 0.08% - $Re=116$.

Estes resultados evidenciam os efeitos da força gravitacional. Neste caso, como $\rho_r \approx 1$, este efeito é desprezível, e foram obtidas interfaces mais planas que resultaram em maiores eficiências.

Casos	Deslocado	Deslocador	Conc/Exc	Vert/Incl	Re	ρ_r	η_r	ϵ_f
1	GX 0.1%	Glicerina 30%	concêntrico	vertical	242	1.072	0.0973	98.53
2	GX 0.1%	Glicerina 30%	exc 75%	vertical	242	1.072	0.0973	93.71
3	GX 0.08%	Glicerina 30%	concêntrico	vertical	242	1.072	0.1377	97.13
4	GX 0.08%	Glicerina 30%	exc 75%	vertical	242	1.072	0.1377	94.61
5	GX 0.1%	Glicerina 30%	concêntrico	vertical	570	1.072	0.1448	97.52
6	GX 0.1%	Glicerina 30%	exc 75%	vertical	570	1.072	0.1448	96.25
7	GX 0.08%	Glicerina 30%	concêntrico	vertical	570	1.072	0.2004	99.30
8	GX 0.08%	Glicerina 30%	exc 75%	vertical	570	1.072	0.2004	98.20
9	GX 0.1%	Glicerina 60%	concêntrico	vertical	49	1.164	0.5168	96.44
10	GX 0.1%	Glicerina 60%	exc 75%	vertical	49	1.164	0.5168	97.98
11	GX 0.08%	Glicerina 60%	concêntrico	vertical	49	1.164	0.7317	98.14
12	GX 0.08%	Glicerina 60%	exc 75%	vertical	49	1.164	0.7317	97.93
13	GX 0.1%	Glicerina 60%	concêntrico	vertical	116	1.164	0.7694	98.77
14	GX 0.1%	Glicerina 60%	concêntrico	incl 45°	116	1.164	0.7694	99.01
15	GX 0.1%	Glicerina 60%	exc 75%	vertical	116	1.164	0.7694	98.19
16	GX 0.1%	Glicerina 60%	exc 75%	incl 45°	116	1.164	0.7694	95.53
17	GX 0.08%	Glicerina 60%	concêntrico	vertical	116	1.164	1.0645	99.19
18	GX 0.08%	Glicerina 60%	concêntrico	incl 45°	116	1.164	1.0645	99.96
19	GX 0.08%	Glicerina 60%	exc 75%	vertical	116	1.164	1.0645	99.74
20	GX 0.08%	Glicerina 60%	exc 75%	incl 45°	116	1.164	1.0645	97.76
21	Glicerina 30%	GX 0.1%	concêntrico	vertical	77	0.933	6.9031	89.52
22	Glicerina 30%	GX 0.1%	exc 75%	vertical	77	0.933	6.9031	82.82
23	Glicerina 60%	GX 0.1%	concêntrico	vertical	77	0.859	1.2997	85.57
24	Glicerina 60%	GX 0.1%	exc 75%	vertical	77	0.859	1.2997	81.08

Tabela 4.7: Casos estudados.

4.2.4

Fluido Viscopoplástico

Para analisar o processo de deslocamento de fluidos com tensão limite de escoamento foi utilizado o Carbopol® 0.1% como fluido deslocado.

As propriedades reológicas do fluido foram medidas no reômetro AR-G2. A fig.4.12 apresenta a curva de tensão em função da taxa de deformação. O comportamento do fluido foi obtido com o modelo *Herschel-Bulkley*, onde a função viscosidade é dada por $\eta = \tau_y / \dot{\gamma} + k \dot{\gamma}^{n-1}$. Os parâmetros obtidos foram $k=1.5420 \text{ Pa.s}^n$, $n=0.437$ e $\tau_y = 2.7981 \text{ Pa}$. Durante os testes experimentais foi necessário o preparo de uma grande quantidade de fluido. Os testes com as diferentes amostras apresentaram pouca variação nos valores dos parâmetros reológicos, com erros inferiores a 10%.

Para os testes experimentais com o Carbopol® sendo o fluido deslocado, as mesmas soluções de glicerina (30% e 60%) foram utilizadas como fluido deslocador. Os testes com a glicerina de 30% deslocando o Carbopol® só foram realizados para a maior vazão. O estudo mais detalhado foi feito com a glicerina 60% deslocando o Carbopol®. As configurações de poço utilizadas foram concêntrica e com 75% de excentricidade para as posições vertical e com 45° de inclinação.

O caso inverso, onde o Carbopol® é fluido deslocador também foi realizado para a maior vazão da bomba. As duas soluções de glicerina foram deslocadas e apenas a posição vertical para configurações concêntrica e excêntrica foram analisadas.

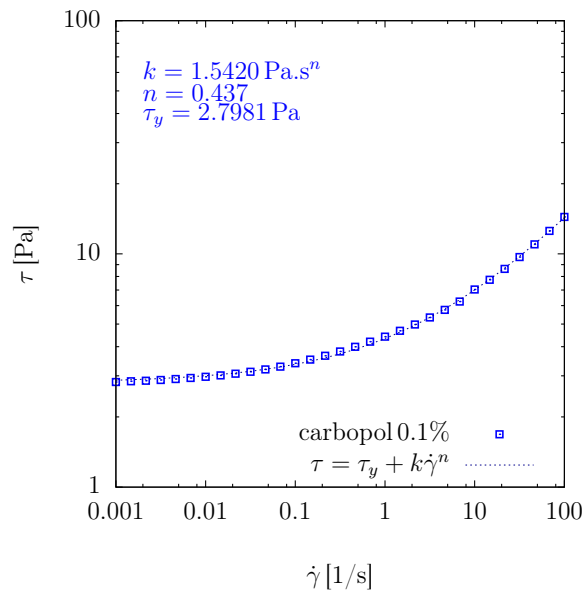


Figura 4.12: *Flow curve* para Carbopol® 0.1%.

Deslocado	Deslocador	Conc/Exc	Vert/Incl	Re	ρ_r	μ_r/η_r	ϵ_f (%)
Carbopol® 0.1%	glicerina 30%	concêntrico	vertical	570	1.072	0.0068	81.4
		exc 75%	vertical	570	1.072	0.0068	78
		concêntrico	incl 45°	570	1.072	0.0068	73.8
		exc 75%	incl 45°	570	1.072	0.0068	74.6
	glicerina 60%	concêntrico	vertical	49	1.164	0.0199	68.41
		exc 75%	vertical	49	1.164	0.0199	71.67
		concêntrico	incl 45°	49	1.164	0.0199	48.10
		exc 75%	incl 45°	49	1.164	0.0199	65.52
		concêntrico	vertical	116	1.164	0.0365	69.23
		exc 75%	vertical	116	1.164	0.0365	60.5
		concêntrico	incl 45°	116	1.164	0.0365	61.12
		exc 75%	incl 45°	116	1.164	0.0365	64.17
glicerina 30%	Carbopol® 0.1%	concentrico	vertical	2.0	0.933	145	87.46
exc 75%		vertical	2.0	0.933	145	81.47	
glicerina 60%		concêntrico	vertical	2.0	0.859	27	81.60
exc 75%		vertical	2.0	0.859	27	79.34	

Tabela 4.8: Casos experimentais estudados.

A tabela 4.8 apresenta todos os parâmetros e resultados dos casos realizados com o Carbopol®. O resumo dos casos testados mostra que quando $\rho^* > 1$, o aumento da razão de viscosidade faz com que a eficiência de deslocamento diminua. Este comportamento pode ser observado para as duas soluções de glicerina utilizadas como fluido deslocador. No caso inverso, Carbopol® deslocando as soluções de glicerina, a razão de viscosidades é menor que 1 e ao aumentar a razão de viscosidade ocorre um aumento da eficiência de deslocamento.

Os resultados para a glicerina 30% deslocando o Carbopol® 0.1% para a maior vazão de bombeio ($Re=570$) é apresentado na fig.4.13. O primeiro gráfico mostra a diferença quando o poço está concêntrico ou excêntrico na posição vertical, e o segundo para a posição inclinada. Analisando o caso vertical, assim como nos casos com fluidos newtonianos e pseudoplásticos, para o poço concêntrico é possível obter um melhor deslocamento do que no caso excêntrico. No deslocamento com o fluido viscoplástico, a assimetria do escoamento é mais intensa porque uma grande quantidade de Carbopol® não é removida da parte mais estreita do anular, pois as tensões na parede são inferiores a tensão limite de escoamento. No caso em que o fluido deslocador é a solução de glicerina

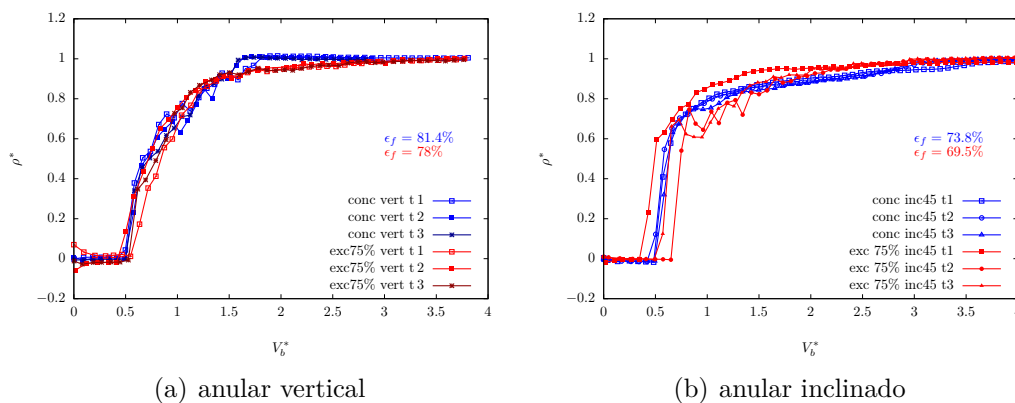


Figura 4.13: Glicerina 30% deslocando Carbopol® 0.1% para anular vertical e inclinado 45°

60%, os resultados são similares ao da solução de 30%. Em todos os casos é possível observar que quando $\rho^* = 1$ (ou seja, na saída do anular $\rho = \rho_2$), $V_b^* < 1$ indicando a formação de interfaces pontiagudas (fig.4.14). A tensão limite faz com que uma camada de fluido se forme próximo a parede, e a sua remoção se torna mais difícil. Esta camada é maior quando Re é menor (tensões menores). Por este motivo, observa-se que as maiores eficiências são obtidas com os maiores valores de número de Re . O efeito da inclinação é também similar aos casos anteriores. A força gravitacional gera instabilidades na interface, reduzindo a eficiência de do processo de deslocamento.

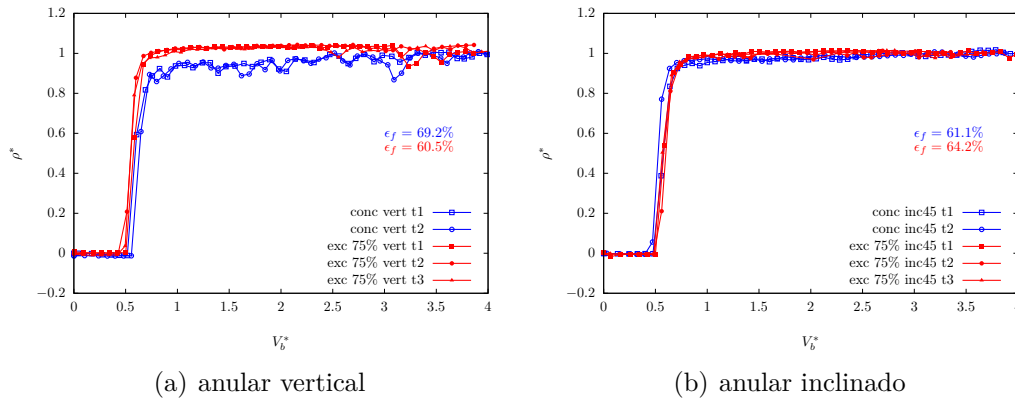


Figura 4.14: Glicerina 60% deslocando Carbopol[®] 0.1% para anular vertical e inclinado 45°

O caso inverso em que o Carbopol[®] 0.1% desloca a solução de glicerina de 30% também foi estudado. Neste caso $\rho_r < 1$ e $\eta_r = 145$. As configurações de poço testadas foram concêntrico e excêntrico vertical para a maior vazão de bombeio. Os resultados destes casos mostram que a solução de glicerina é deslocada em aproximadamente dois volumes de Carbopol[®] bombeados. Até que esse volume seja atingido uma mistura de Carbopol[®] e glicerina é deslocada. Para este caso é possível observar um comprimento de mistura entre os fluidos, o deslocamento ocorre com uma eficiência de 87% para o caso concêntrico e de 81% para o caso excêntrico. Estes casos apresentaram eficiência maior em relação aos casos anteriores, provavelmente devido ao aumento na razão de viscosidades, que favorece o deslocamento. A mistura entre os fluidos observada pela visualização do processo de deslocamento.

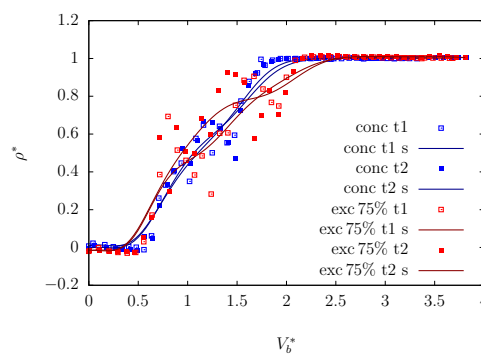


Figura 4.15: Carbopol[®] 0.1% deslocando glicerina 30% para anular concêntrico e excêntrico verticais.

4.2.5

Comparação fluido viscoplástico e fluido pseudoplástico deslocados pelas soluções de glicerina

A comparação da eficiência no deslocamento de um fluido pseudoplástico (goma xantana) e de um fluido viscoplástico (Carbopol®) mostra que a tensão limite de escoamento presente no fluido viscoplástico dificulta o seu deslocamento. Isto porque a tensão limite induz a formação de uma camada de fluido não deslocado próxima a parede da tubulação, difícil de ser removida.

Os resultados para a glicerina de 60% deslocando o Carbopol® 0.1% e a goma xantana 0.1% para Re iguais a 49 e 116 são apresentados na fig.4.2.5. Os casos mostrados são para o poço concêntrico e vertical.

Observa-se que para o fluido pseudoplástico a interface é mais plana, ou seja a goma xantana é removida com o bombeio de aproximadamente um volume de glicerina. No caso do Carbopol®, quando $\rho^* = 1$ o volume bombeado adimensional (V_b^*) é menor que 1, indicando que o Carbopol® ainda está presente no espaço anular.

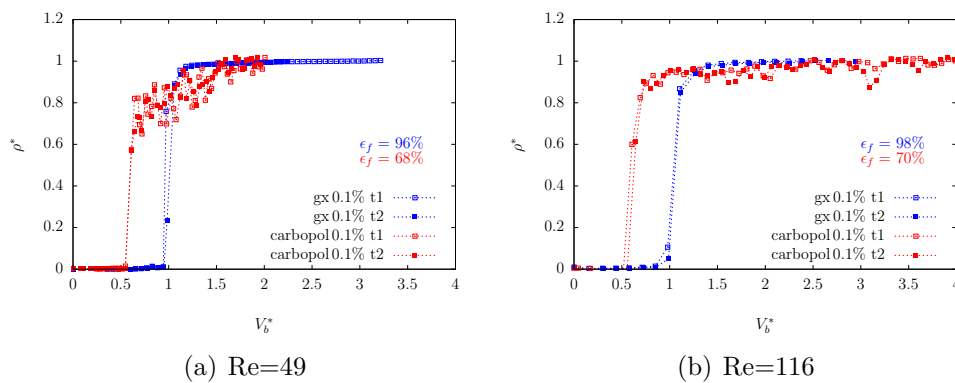


Figura 4.16: Comparação Carbopol® 0.1% e GX 0.1% deslocados por glicerina 60% para Re=49 e 116.

4.2.6

Fluido Tixotrópico

Uma análise experimental qualitativa utilizando a Laponita® foi realizada com o objetivo de investigar o efeito da tixotropia no deslocamento de um fluido pelo outro. A Laponita® é um fluido com característica tixotrópica, isto é, a viscosidade depende também do tempo de cisalhamento. Os testes foram realizados para duas vazões e o fluido deslocador utilizado foi a solução de glicerina 60%. Foram realizados testes com anular concêntrico e vertical.

O procedimento de preparo do fluido está melhor detalhado no Apêndice A. Para medir os parâmetros reológicos da Laponita® foram realizados testes

de taxa de deformação constante, e posteriormente feita a curva de τ vs. $\dot{\gamma}$. As curvas de tensão e viscosidade para taxas de deformação constante ao longo do tempo são apresentadas pelas figs.4.17(a) e 4.17(b).

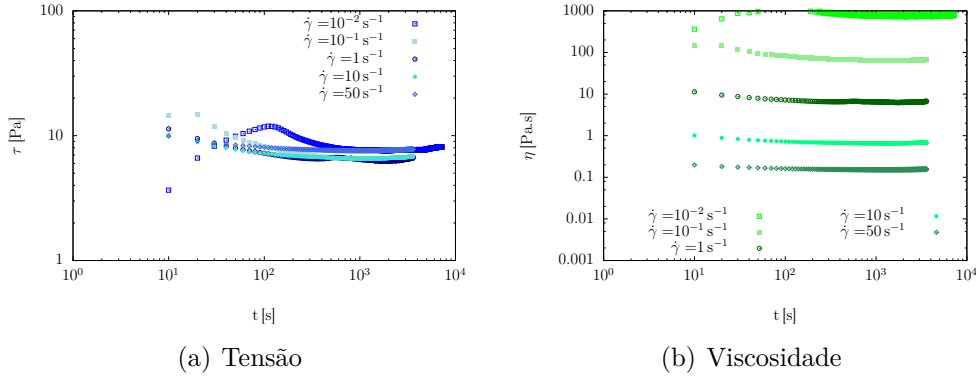


Figura 4.17: Curvas de tensão e viscosidade para taxas de deformações diferentes.

O tempo de espera para o início do deslocamento da Laponita® 2% pela solução de glicerina 60% foi variado para investigar o efeito do tempo de reestruturação do fluido. Os tempos de espera escolhidos foram 0 h (teste logo após o preenchimento do anular com a Laponita), 0.5 h, 1 h e 2 h. Os resultados mostram que o tempo de repouso faz diferença na eficiência de deslocamento para as duas vazões testadas.

A fig.4.18 apresenta o deslocamento da Laponita® 2% pela glicerina 60% para $Re=49$ em diferentes tempos de espera para o início do deslocamento. Observando a interface formada entre os fluidos, a mais plana ocorre para o tempo de espera igual a zero, i.e., quando o fluido está menos estruturado e portanto com níveis de viscosidade menores. No entanto, para tempo de espera de 1 hora e 2 horas, também ocorre a formação de uma interface aproximadamente plana, mostrando que não há diferença significativa entre os casos. O gráfico da eficiência de deslocamento, apresentado na fig.4.19 mostra isso, não há muita diferença nos valores obtidos para a eficiência de deslocamento para os diferentes tempos de espera, quando a vazão é mais baixa. Considerando que o fluido tem um tempo de quebra/reestruturação igual a t_f , pode-se definir um tempo adimensional de quebra/reestruturação dado por:

$$t^* = \frac{t_f}{t_{esc}}, \quad (4-1)$$

onde t_f é tempo de quebra/reestruturação e t_{esc} é o tempo característico do escoamento. Com vazões baixas, t_{esc} é alto e t^* baixo. Assim, o comportamento tixotrópico não alterou o processo de deslocamento.

Com o aumento da vazão e a Laponita® estruturada após o tempo de espera, o seu deslocamento é dificultado. A visualização qualitativa dos testes

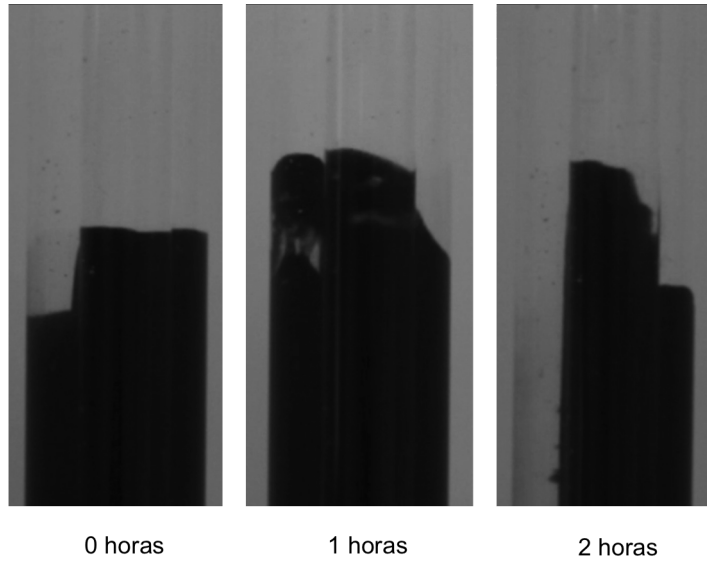


Figura 4.18: Deslocamento para tempos de espera iguais a 0 horas, 1 hora e 2 horas.

experimentais mostra que a Laponita[®] não consegue ser removida pela glicerina 60% (fig.4.2.6). Com as maiores vazões, t_{esc} é mais baixo e t^* mais elevado. Assim o efeito tixotrópico é mais pronunciado e as eficiências de deslocamento são menores. Observa-se que por conta da consistência de gel da Laponita[®], é difícil conseguir repetibilidade dos testes.

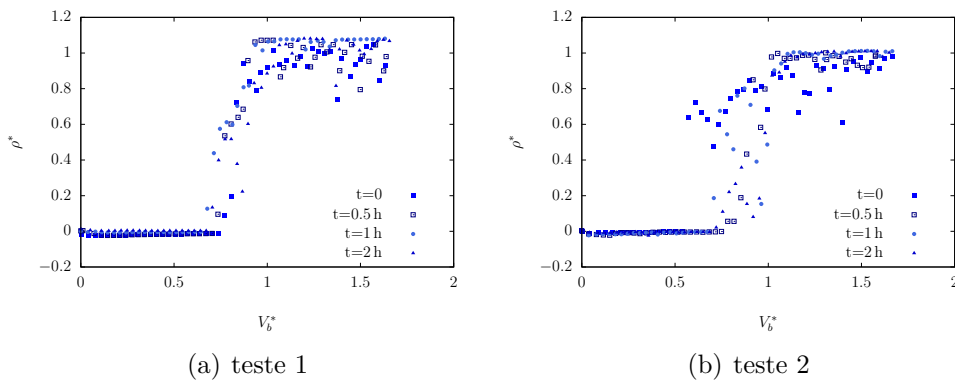


Figura 4.19: Glicerina 60% deslocando Laponita[®] 2% para $Re=49$.

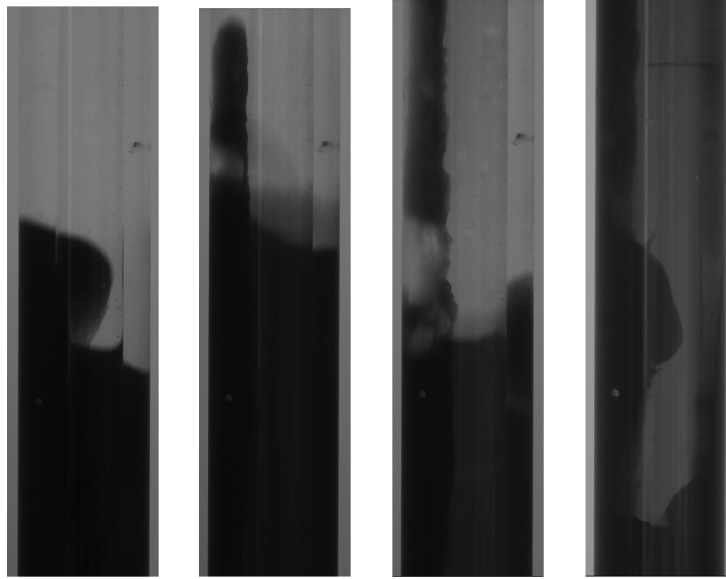


Figura 4.20: Deslocamento para tempos de espera iguais a 0 horas, 0.5 horas 1 hora e 2 horas.

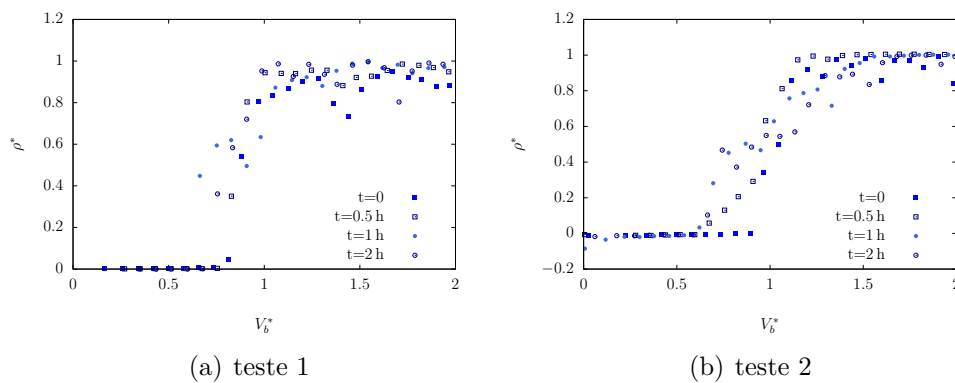


Figura 4.21: Glicerina 60% deslocando Laponita[®] 2% para $Re=116$.

4.3

Casos reais: Fluido de Perfuração 1 e Fluido de Perfuração 2

Nesta etapa foram utilizados fluidos de campo fornecidos pelo CEN-PES/Petrobras para os deslocamentos. Dois fluidos de perfuração com densidades e parâmetros reológicos diferentes foram utilizados como fluido deslocado. Como fluido deslocador foi utilizado a n-parafina.

A n-parafina é um fluido newtoniano menos denso e mais viscoso do que a água, muito utilizado nos processos de perfuração e completação de poços. Já os fluidos de perfuração 1 e 2 apresentam um comportamento viscoplástico. As tabelas 4.9 e 4.10 apresentam as propriedades dos fluidos medidas no laboratório, e a fig.4.22 a curva de τ vs. $\dot{\gamma}$ para os fluidos de perfuração 1 e 2 (FP 1 e FP 2) que foram modelados pela equação de *Herschel-Bulkley*.

Um resumo de todos os casos estudados é apresentado na tabela 4.11.

Fluidos	ρ [kg/m ³]	μ [Pa.s]
n-parafina	799.2	0.002332

Tabela 4.9: Propriedades da n-parafina.

Fluidos	ρ [kg/m ³]	τ_y [Pa.s]	k [Pa.s ⁿ]	n
FP 1	1153.5	2.3489	0.0670	0.90354
FP 2	1553.7	2.9285	0.17069	0.88945

Tabela 4.10: Propriedades dos fluidos de perfuração 1 e 2.

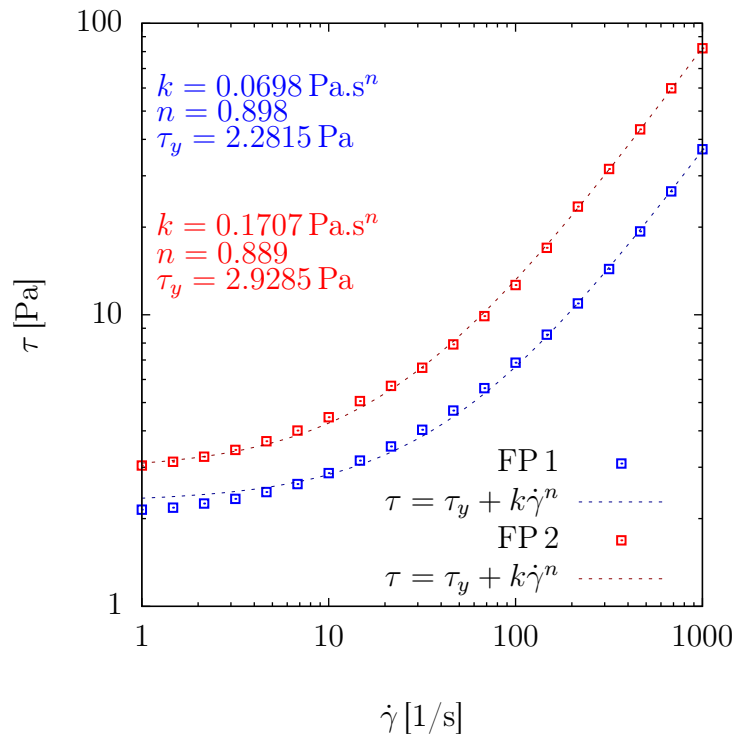


Figura 4.22: Reologia dos fluido de perfuração 1 e 2.

Uma investigação do efeito da vazão, parâmetros reológicos e posicionamento do poço foi realizada.

O primeiro caso testado foi n-parafina deslocando o FP 1 para poço concêntrico nas posições vertical e inclinada (45°). Para cada teste duas vazões foram avaliadas. As vazões correspondem a Re iguais a 187 e 438.

Os resultados obtidos são apresentados na fig.4.23. Observa-se que caso vertical, o aumento do Re não altera a eficiência de deslocamento. Para ambos os casos são necessários o equivalente a três volumes do anular para remover o FP 1. Para o caso inclinado, até um volume de fluido bombeado, a menor vazão é mais eficiente, mas ao final do processo, é com a maior vazão que ocorre uma melhor remoção do FP 1. Dessa forma, novamente observa-se que o aumento do número de Re leva a uma maior eficiência no processo de deslocamento.

Os testes para a geometria excêntrica obtiveram resultados semelhantes

Deslocador	Deslocado	Conc/Exc	Vert/Incl	Re	ρ_r	μ_r/η_r	ϵ_f (%)
n-parafina	FP 1	concêntrico	vertical	187	1.443	98.392	67.86
		concêntrico	vertical	438	1.443	53.054	74.73
		concêntrico	Incl. 45°	187	1.443	98.392	39.4
		concêntrico	Incl. 45°	438	1.443	53.054	59.87
		exc 75%	vertical	187	1.443	98.392	71.93
		exc 75%	vertical	438	1.443	53.054	75.12
		exc 75%	Incl. 45°	187	1.443	98.392	47.63
		exc 75%	Incl. 45°	438	1.443	53.054	65.83
	FP 2	concêntrico	vertical	187	1.944	149.738	71.2
		concêntrico	vertical	438	1.944	90.472	80.21
		concêntrico	Incl. 45°	187	1.944	149.738	46.92
		concêntrico	Incl. 45°	438	1.944	90.472	70.9
		exc 75%	vertical	187	1.944	149.738	70.86
		exc 75%	vertical	438	1.944	90.472	79.21
		exc 75%	Incl. 45°	187	1.944	149.738	54.38
		exc 75%	Incl. 45°	438	1.944	90.472	65.794

Tabela 4.11: Casos estudados.

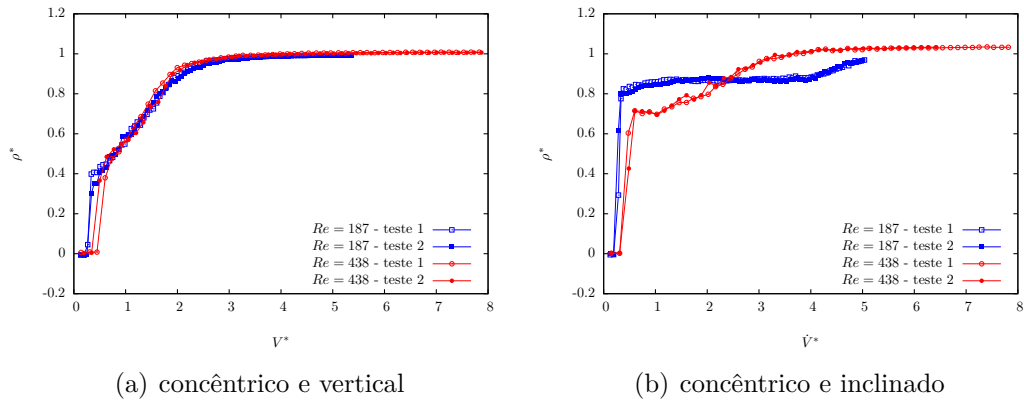


Figura 4.23: N-parafina deslocando FP 1 em anular concêntrico para $Re=187$ e $Re=438$.

ao que ocorreu para o caso concêntrico, como mostra a fig.4.24. Porém, houve uma melhora na eficiência nos casos excêntricos. Nota-se que este comportamento é diferente dos casos anteriores.

A inclinação resultou em eficiências menores ao longo do processo, devido as instabilidades, como nos casos anteriores, leva a formação de interfaces pontiagudas.

O mesmo comportamento observado no caso com o FP 1 foi observado com o FP 2. Ao final de um volume bombeado, no caso inclinado mais fluido de perfuração foi removido. No entanto, ao final do processo a eficiência é semelhante para os dois casos (fig.4.25).

Observa-se que ao final de um volume bombeado, no caso inclinado mais fluido de perfuração foi removido. No entanto, ao final do processo a eficiência

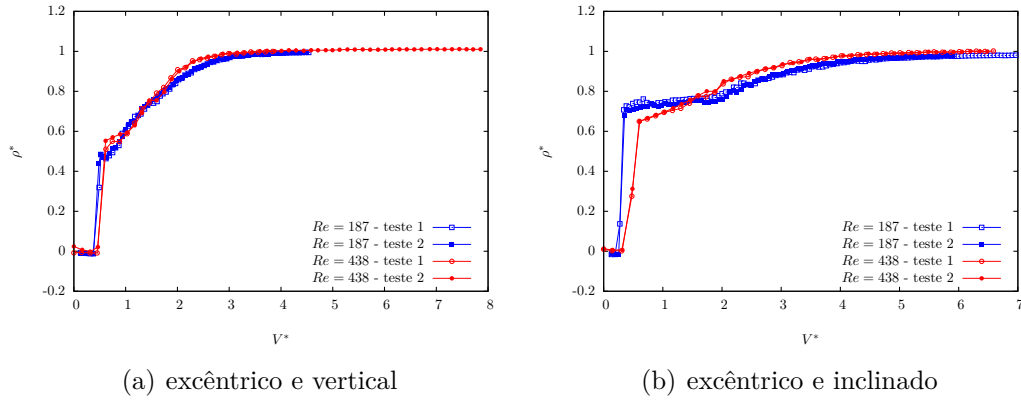


Figura 4.24: N-parafina deslocando FP 1 em anular excêntrico para $Re=187$ e $Re=438$.

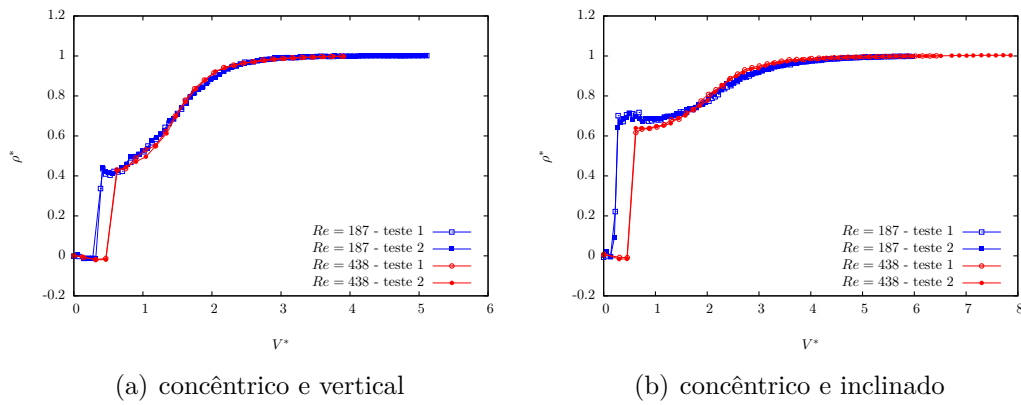


Figura 4.25: N-parafina deslocando FP 2 em anular concêntrico para $Re=187$ e $Re=438$.

é semelhante para os dois casos (fig.4.26).

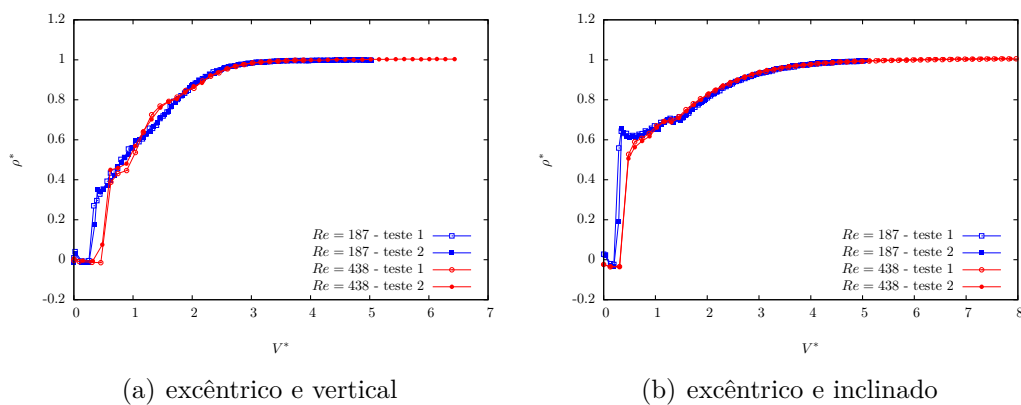


Figura 4.26: N-parafina deslocando FP 2 em anular excêntrico para $Re=187$ e $Re=438$.

Os resultados para os dois fluidos de perfuração mostra que a n-parafina forma um *finger*, perfurando o FP. No entanto, a remoção do fluido de perfuração ocorre para três volumes bombeados independente da posição do

poço e vazão. Para esses casos, vale ressaltar que uma melhor eficiência de deslocamento ocorre em regime turbulento de escoamento.

4.4

Resultados Numéricos

Nesta seção serão apresentados os resultados numéricos obtidos para fluidos pseudoplástico e viscoplástico, deslocados por fluidos newtonianos. Além disso, fez-se um estudo do processo de deslocamento para um par de fluidos viscoplásticos.

O estudo numérico teve como objetivo a investigação de uma faixa diferente de parâmetros daqueles analisados no experimento.

4.4.1

Fluido pseudoplástico

O fluido pseudoplástico é modelado pela equação *Power-Law*, dada por $\eta = k\dot{\gamma}^{n-1}$. As propriedades do fluido pseudoplástico deslocado, usadas nas simulações a seguir são: $k=119.72 \text{ Pa.s}^n$ e $n=0.50342$. Para os fluidos deslocadores utilizou-se fluidos newtonianos com propriedades similares as da glicerina com concentrações de 30% e 60%. Assim, $\rho = 1071.9 \text{ kg/m}^3$ e $\mu = 0.0025 \text{ Pa.s}$ para a concentração de 30% e $\rho = 1163.6 \text{ kg/m}^3$ e $\mu = 0.01195 \text{ Pa.s}$ para a de 60%.

O resultado numérico apresentado na fig.4.27 mostra o deslocamento de um fluido pseudoplástico pela solução de glicerina 30% para $Re=242$. Os campos de fração volumétrica (4.56(a)), taxa de deformação (4.27(b)) e velocidade (4.56(c)) do escoamento são apresentados em um plano axial. Analisando a interface de deslocamento é possível observar que a mesma é plana, levando a maior eficiência de deslocamento. O campo de taxa de deformação apresenta valores mais altos próximos às paredes e na região da interface, onde as tensões são mais elevadas. Analisando a distribuição de velocidades, observa-se uma zona de baixas velocidades no fluido deslocador, próximo a interface. O fluido deslocador é parado pela presença do fluido deslocado.

Ao trocar o fluido deslocador pela glicerina 60%, aumenta-se a viscosidade do fluido deslocador, e a razão de viscosidades, a interface de deslocamento se mantém plana. O comportamento da taxa de deformação e velocidade são qualitativamente semelhantes. A fig.4.28 apresenta os resultados obtidos.

Aumentando a vazão e mantendo a glicerina 60% deslocando o fluido pseudoplástico ($Re=116$) a viscosidade característica do fluido deslocado diminui, aumentando a razão de viscosidades para o caso. Os resultados mostram

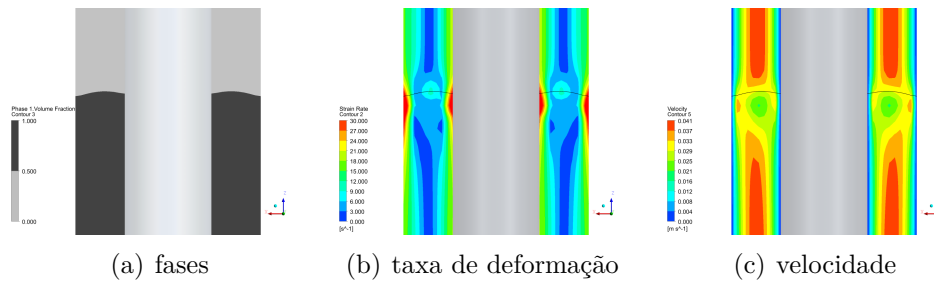


Figura 4.27: Campos de fração volumétrica, taxa de deformação e velocidade em plano axial para $Re=242$.

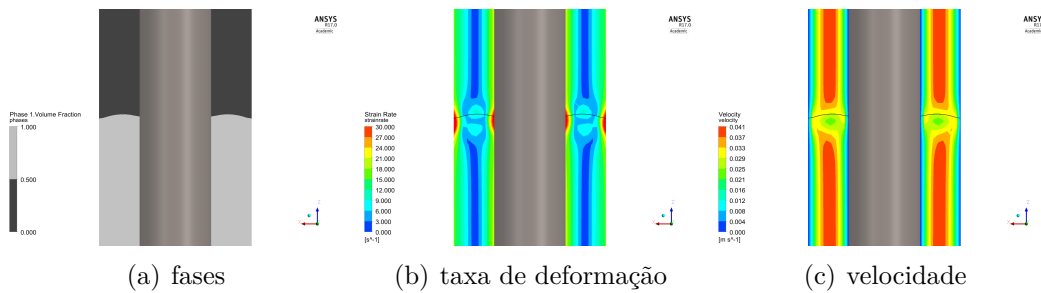


Figura 4.28: Campos de fração volumétrica, taxa de deformação e velocidade em plano axial para $Re=49$.

que a interface entre os dois fluidos deixa de ser plana e um *finger* passa a ser formado. A fig.4.29 apresenta os campos de fração volumétrica, taxa de deformação e velocidade para o caso.

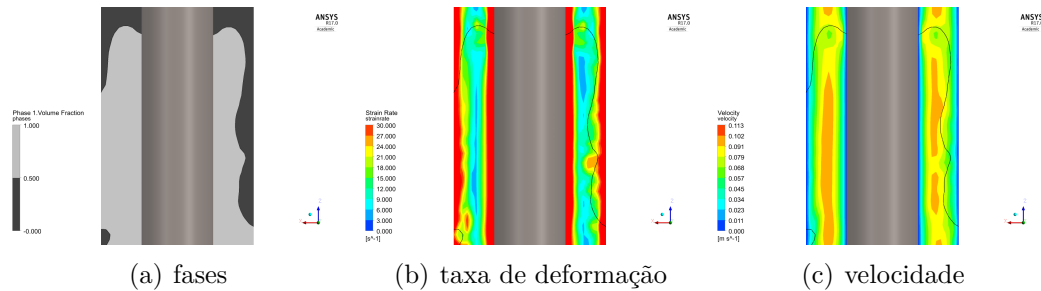


Figura 4.29: Campos de fração volumétrica, taxa de deformação e velocidade em plano axial para $Re=116$.

Os cortes transversais posicionados em $z= 0.23\text{ m}$, 0.25 m e 0.35 m são apresentados nas figs.4.30, 4.31, 4.32 e 4.33. Esses cortes mostram que para diferentes posições, camadas do fluido deslocado ficam no interior do anular. O deslocamento torna-se mais instável, afetando a eficiência do processo.

Simulações para maiores valores de Re foram realizadas buscando investigar o efeito da vazão. Os valores de Re selecionados foram 203, 600 e 1000, sempre em regime laminar.

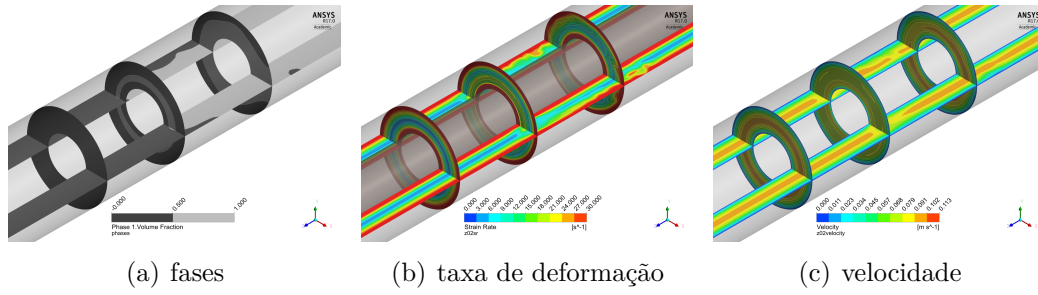


Figura 4.30: Campos de fração volumétrica, taxa de deformação e velocidade em planos transversais para $Re=116$.

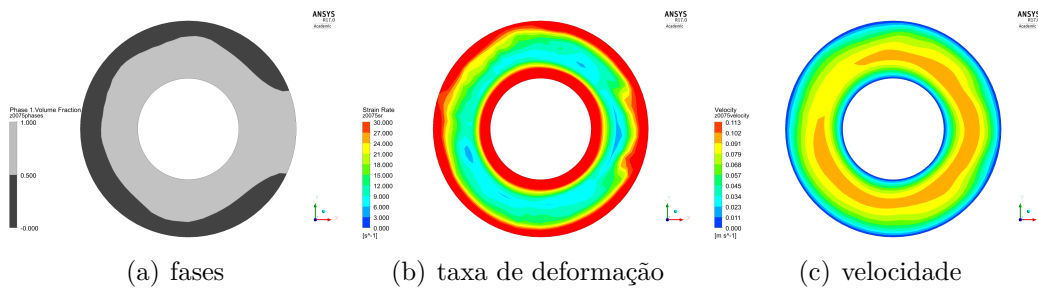


Figura 4.31: Campos numéricos no plano $z=0.23$ m para $Re=116$.

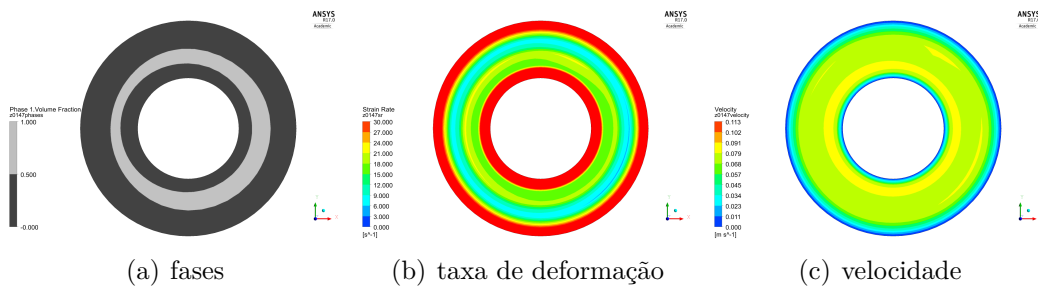


Figura 4.32: Campos numéricos no plano $z=0.25$ m para $Re=116$.

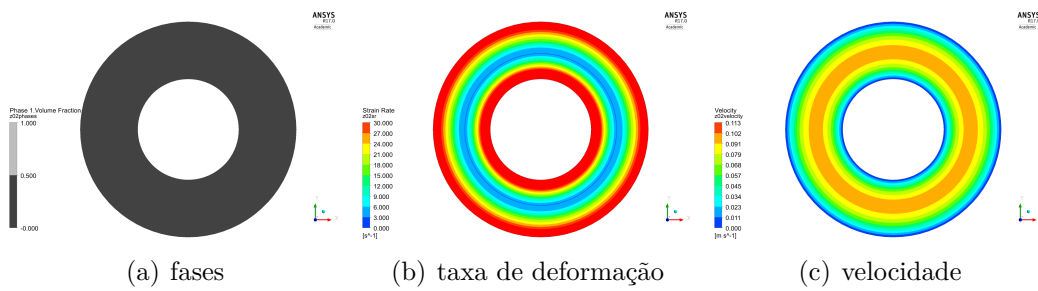


Figura 4.33: Campos numéricos no plano $z=0.35$ m para $Re=116$.

A razão de densidades (ρ_r) para os casos foi mantida constante e igual a 1.16 e a razão de viscosidades (η_r) aumentou com o aumento da vazão conforme mostra a tabela 4.12. Porém, em todos os casos, $\eta_r \ll 1$.

Os resultados do deslocamento do fluido pseudoplástico pela glicerina 60% para diferentes valores de Re são apresentados na fig.4.34. O grá-

Re	η_c	η_r
49	0.0122	1.52e-04
116	0.0081	7.70e-04
203	0.0063	1.06e-03
600	0.0038	1.65e-03
1000	0.0029	2.09e-03

Tabela 4.12: Tabela de razão de viscosidades para fluido pseudoplástico.

fico mostra a variação adimensional de densidade na saída do anular (ρ^*) em função do volume bombeado adimensional (V^*). As curvas mostram que a eficiência de deslocamento diminui com o aumento do número de Re, devido às instabilidades geradas pelo aumento da inércia que resultam em interface mais pontiaguda. Este comportamento difere dos casos experimentais devido as faixas de razões de viscosidade. Nos casos numéricos, analisou-se o caso limite em que $\eta_r \ll 1$, enquanto que nos casos experimentais η_r era da ordem de 1. Nestes últimos, o aumento de Re levava a maiores eficiências.

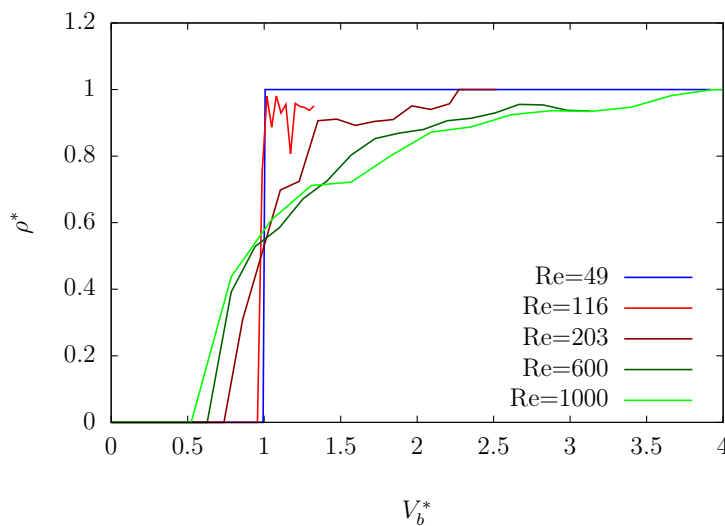


Figura 4.34: Campos de fração volumétrica para todos os Re.

Os campos de fração volumétrica mostram que apenas para Re=49 a interface entre os fluidos é plana. O caso Re=116 pode ser considerado uma transição, onde uma maior força de inércia gera instabilidades tornando a interface instável. A partir deste Re os resultados apresentam o formato de *finger* (fig.4.35). Nesses casos, o aumento do Re e consequentemente da vazão não trouxe aumento significativo de eficiência de deslocamento. Esse aumento de vazão diminui a viscosidade característica (η_c) do fluido pseudoplástico. Assim, quando $\eta_r > 1$ a formação de *finger* é observada. Nos casos em que ocorre a formação de *finger* quanto maior o Re mais fino é o *finger* e menor é o V^* quando $\rho^* = 1$.

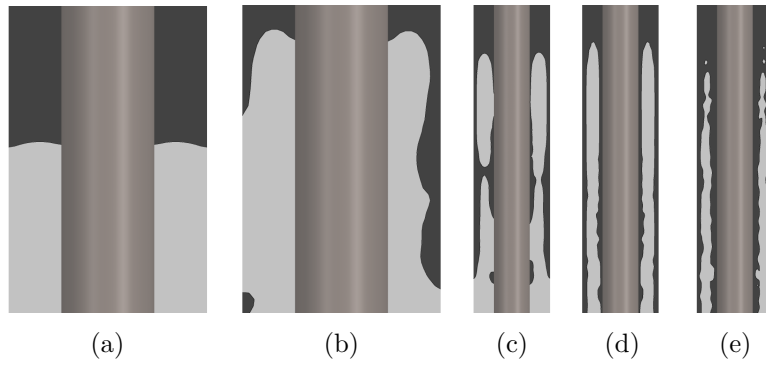


Figura 4.35: Campos de fração volumétrica em um plano axial para todos os Re investigados.

Foram realizadas também duas simulações para fluidos viscoplásticos, com os mesmos valores de índice de consistência e índice *Power-Law* ($k=119.72 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ e $n=0.50342$) tensões limite iguais a $\tau_y=5 \text{ kPa}$ e $\tau_y=10 \text{ kPa}$. O número de Reynolds foi mantido a 116 e o anular era concêntrico e vertical. A razão de densidades para os casos é igual a dos casos anteriores ($\rho_r = 1.16$) e as razões de viscosidade são iguais a $6.4\text{e-}05$ (para $\tau_y=5 \text{ kPa}$) e $3.3\text{e-}05$ (para $\tau_y=10 \text{ kPa}$), i.e., ambas muito menores que 1.

Observando o resultado do campo de fração volumétrica para os casos analisados, a interface formada entre os dois fluidos é praticamente igual em todos os casos. Para os dois casos a interface é praticamente plana e os campos de taxa de deformação e velocidade não apresentam alterações significativas que pudessem afetar o deslocamento dos fluidos. Os campos de fração volumétrica, taxa de deformação e velocidade para os casos com $\tau_y=5 \text{ kPa}$ e $\tau_y=10 \text{ kPa}$ são apresentados pelas figs.4.36 e 4.39 respectivamente.

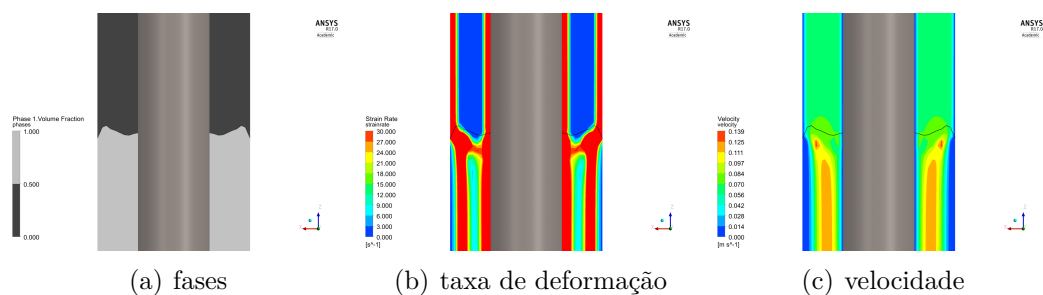


Figura 4.36: Campos numéricos em plano axial para glicerina 60% deslocando fluido viscoplástico com $\tau_y = 5 \text{ kPa}$ para $Re=116$.

Observa-se que as taxas de deformação máximas ocorrem próximas as paredes e a interface entre os fluidos. A presença da tensão limite de escoamento parece estabilizar o escoamento, causando um escoamento mais efetivo.

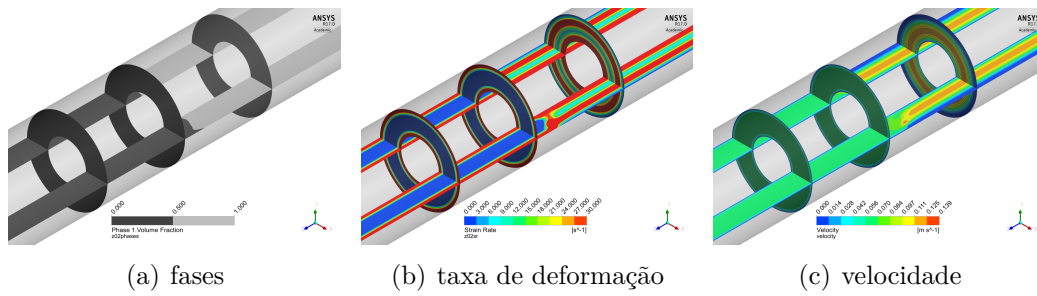


Figura 4.37: Campos numéricos em cortes transversais do deslocamento do fluido viscoplástico com $\tau_y = 5$ kPa pela glicerina 60% para $Re=116$.

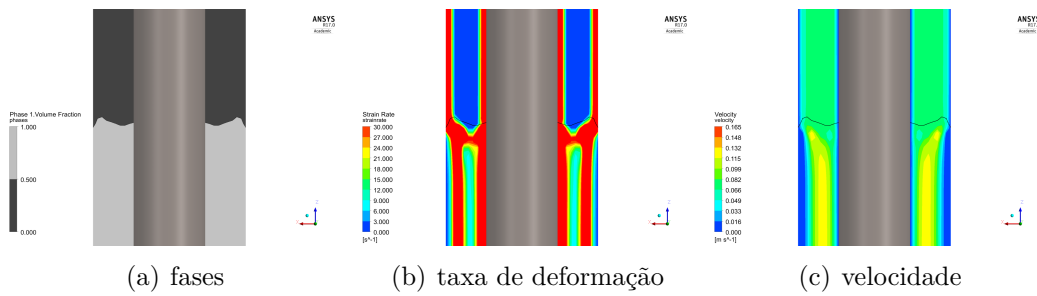


Figura 4.38: Campos numéricos em plano axial para glicerina 60% deslocando fluido viscoplástico com $\tau_y = 10$ kPa para $Re=116$.

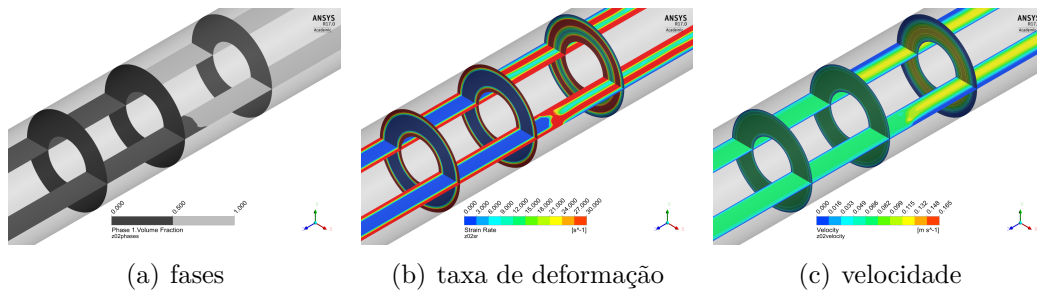


Figura 4.39: Campos numéricos em cortes transversais do deslocamento do fluido viscoplástico com $\tau_y = 10$ kPa deslocado pela glicerina 60% para $Re=116$.

4.4.2

Efeito da variação de densidades

Com o intuito de investigar a influência da hierarquia de densidades no deslocamento de um fluido pelo outro, testes numéricos foram realizados para a glicerina de 60% deslocando um fluido pseudoplástico para duas vazão de bombeio. Foram considerados apenas a configuração concêntrica e vertical do anular. Os parâmetros reológicos do fluido deslocado, modelado pela equação *Power-Law*, considerados foram $k=119.2 \text{ Pa.s}^n$ e $n=0.50342$.

Os dois primeiros casos estudados foram considerando a densidade dos fluidos deslocado e deslocadores iguais a densidade da glicerina. Assim, para $\rho_1 = \rho_2 = 1$ as razões de viscosidade são $\eta_r=2.75e-04$ para a menor vazão

e $\eta_r = 4.10e-04$ para a maior vazão, isto é, ambas muito menores que 1. Os resultados obtidos para $\rho_1 = \rho_2$ e $\eta_r = 2.75e-04$ são apresentados na (fig.4.40) em um plano axial. Os campos de fração volumétrica, taxa de deformação e velocidade são apresentados nas figs.4.40(a), 4.40(b) e 4.40(c). A interface plana indica que o fluido pseudoplástico foi completamente removido do anular em um volume bombeado, ou seja, com eficiência de aproximadamente 100%. A taxa de deformação é mais alta próxima a parede na região da interface entre os fluidos e a velocidade é mais alta região central. Nota-se também, uma região de baixa velocidade no fluido deslocador, próxima a interface. Para o caso $\rho_1 = \rho_2$ e $\eta_r = 4.10e-04$ apresentado na fig.4.42 é observado uma queda na eficiência de deslocamento. O campo de fração volumétrica (fig.4.42(a)) mostra que a interface deixa de ser plana e ocorre a formação de um *finger*. Em toda a região próxima a parede a taxa de deformação aumenta (fig.4.42(b)) e a velocidade é maior na região central do espaço anular (fig.4.42(c)). Observa-se também as instabilidades geradas nos campos de velocidade e taxa de deformação.

Cortes transversais em $z=0.23$ m, 0.25 m e 0.31 m são apresentados nas figs.4.41 e 4.43 para os casos em que $\eta_r = 2.75e-04$ e $\eta_r = 4.10e-04$, respectivamente, mostrando de forma mais detalhada o processo de deslocamento.

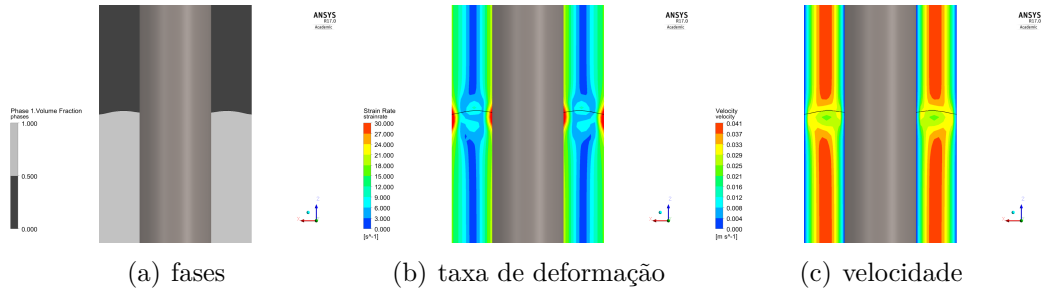


Figura 4.40: Campos numéricos no plano axial para $\rho_1 = \rho_2$ e $\eta_r = 2.75e-04$.

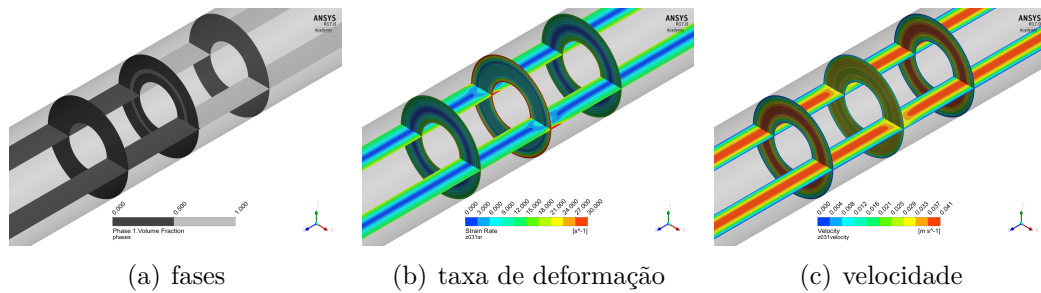


Figura 4.41: Cortes transversais em $z=0.23$ m, 0.25 m e 0.31 m para $\rho_1 = \rho_2$ e $\eta_r = 2.75e-04$.

O outro teste realizado foi considerando a densidade do fluido deslocado maior que a do fluido deslocador ($\rho_1 > \rho_2$) para as mesmas duas razões de viscosidade $\eta_r = 2.75e-04$ (menor vazão) e $\eta_r = 4.10e-04$ (maior vazão).

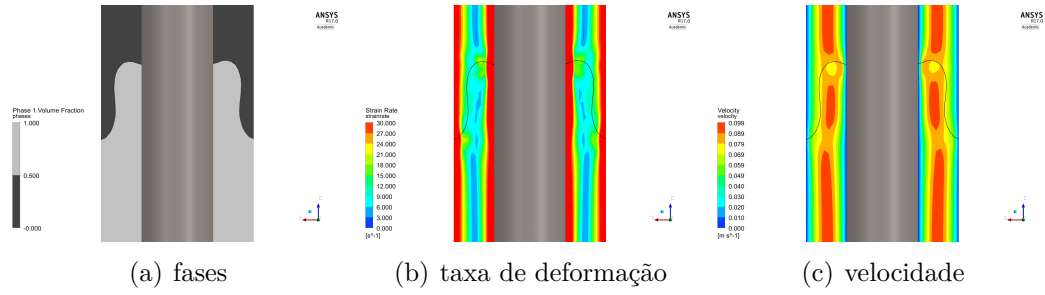


Figura 4.42: Campos numéricos em um plano axial para $\rho_1 = \rho_2$ e $\eta_r = 4.10e-04$.

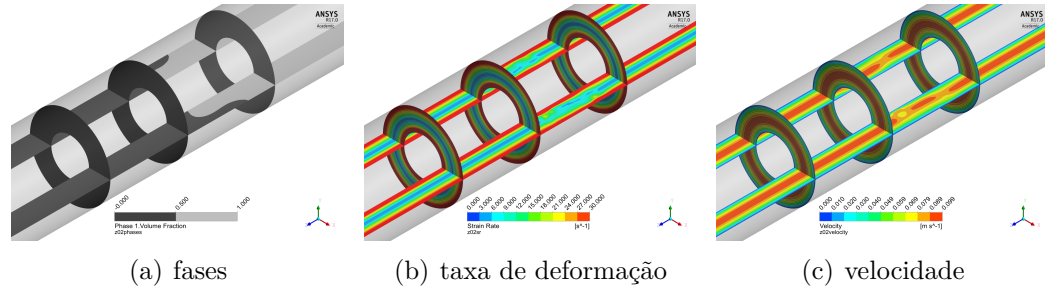


Figura 4.43: Cortes transversais em $z=0.23$ m, 0.25 m e 0.31 m para $\rho_1 = \rho_2$ e $\eta_r = 4.10e-04$.

A fig.4.44 apresenta a isocurva da velocidade do fluido deslocador no anular para $\rho_1 > \rho_2$ ($\rho_r = 0.86$) e $\eta_r = 2.75e-04$. É possível observar que para o instante de tempo escolhido parte do fluido pseudoplástico não é removido. A interface não é plana, forma não simétrica, formando *fingers* ao longo do processo. Cortes transversais em $z=0.23$ m, 0.25 m e 0.31 m dos campos de fração volumétrica, taxa de deformação e velocidade são apresentados respectivamente pelas figs.4.45(a), 4.45(b) e 4.45(c). Analisando o campos separadamente para cada posição de z (figs.4.46, 4.47 e 4.48) nota-se que em todas as posições o fluido pseudoplástico não é removido (figs.4.46(a), 4.47(a) e 4.48(a)). O campo de taxa de deformação na região em que o fluido pseudoplástico não é completamente removido mostra que as tensões e taxas de deformação são mais elevadas do que nas outras regiões do anular (figs.4.46(b), 4.47(b) e 4.48(b)).

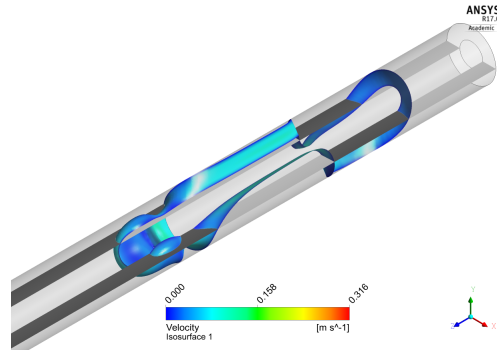


Figura 4.44: Isocurva de velocidade do fluido deslocador para $\rho_1 > \rho_2$ e $\eta_r = 2.75e-04$.

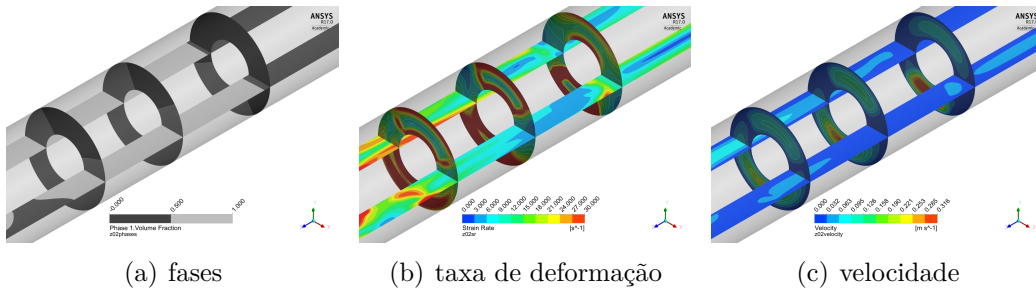


Figura 4.45: Cortes transversais em $z=0.23$ m, 0.25 m e 0.31 m para $\rho_1 > \rho_2$ e $\eta_r = 2.75e-04$.

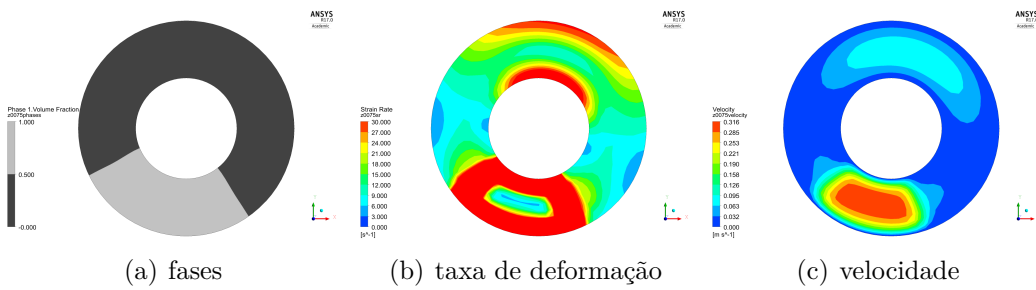


Figura 4.46: Campos numéricos para corte transversal em $z=0.25$ m para $\rho_1 > \rho_2$ e $\eta_r = 2.75e-04$.

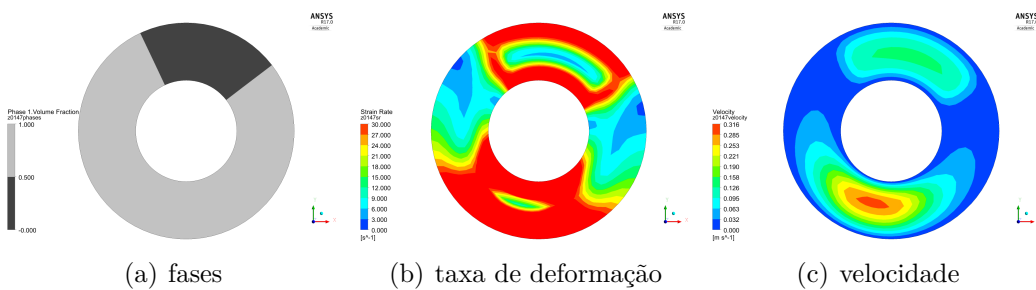


Figura 4.47: Campos numéricos para corte transversal em $z=0.28$ m para $\rho_1 > \rho_2$ e $\eta_r = 2.75e-04$.

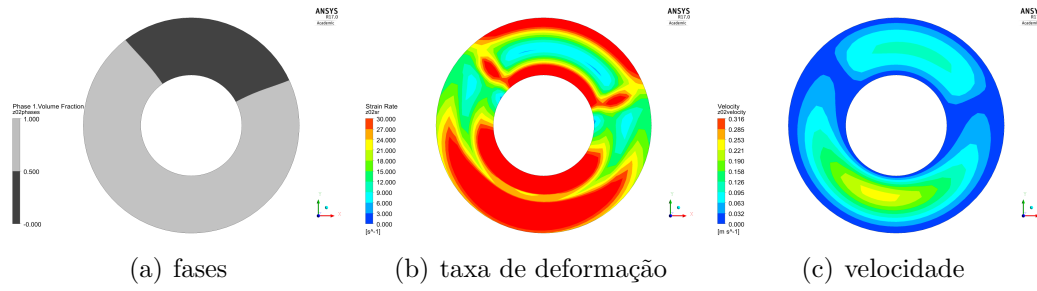


Figura 4.48: Campos numéricos para corte transversal em $z=0.31$ m para $\rho_1 > \rho_2$ e $\eta_r = 2.75e-04$.

Para o caso em que $\rho_1 > \rho_2$ e $\eta_r = 4.10e-04$ é possível observar a formação de uma interface mais plana como mostra a isocurva da velocidade do fluido deslocador no anular (fig.4.49). Os cortes transversais para fração volumétrica, taxa de deformação e velocidade são apresentados nas figs.4.50(a), 4.50(b) e 4.50(c). Analisando separadamente cada posição de z , nota-se que em $z=0.25$ m ainda tem uma camada de fluido pseudoplástico para ser removido (fig.4.51(a)) e a taxa de deformação (figs.4.51(b)) nessa região é maior do que no resto do espaço anular. Para $z=0.28$ m, essa camada diminui, e em $z=0.31$ m o fluido pseudoplástico foi totalmente removido (figs.4.52(a) e 4.53(a)).

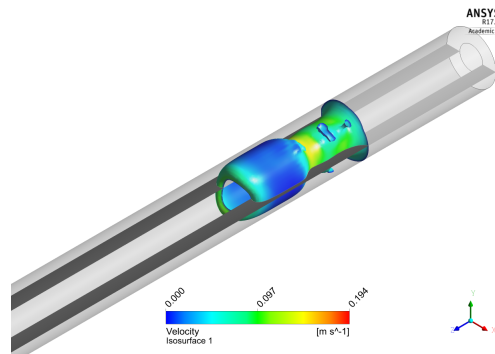


Figura 4.49: Isocurva da velocidade do fluido deslocador para $\rho_1 > \rho_2$ e $\eta_r = 4.10e-04$.

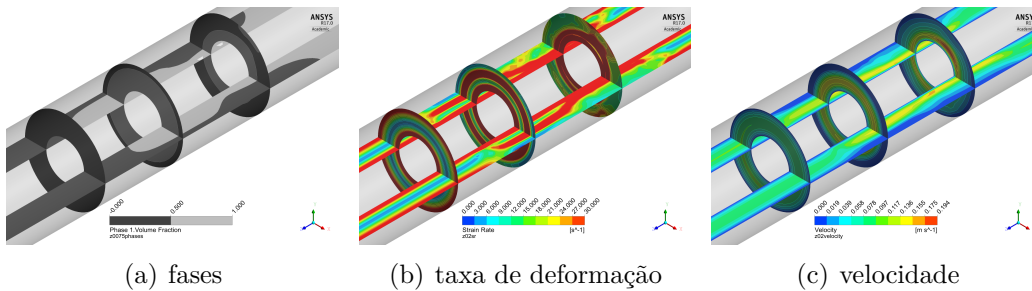


Figura 4.50: Cortes transversais em $z=0.25$ m, 0.28 m e 0.31 m para $\rho_1 > \rho_2$ e $\eta_r = 4.10e-04$.

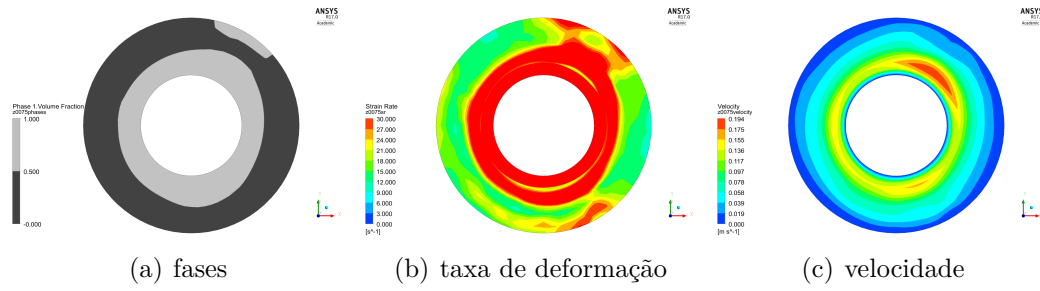


Figura 4.51: Campos numéricos para corte transversal em $z=0.25$ m para $\rho_1 > \rho_2$ e $\eta_r = 4.10e-04$.

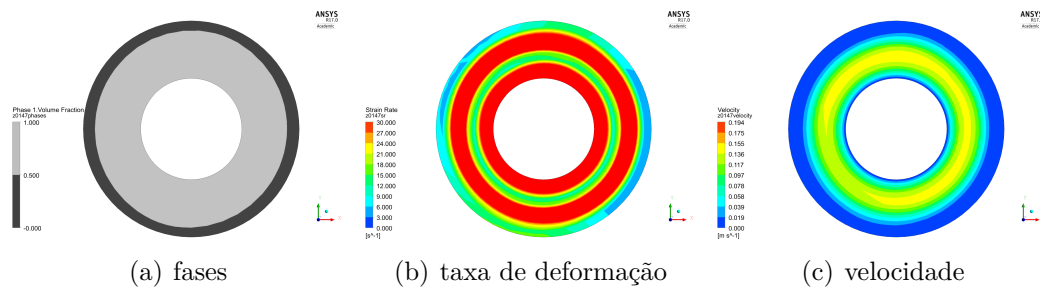


Figura 4.52: Campos numéricos para corte transversal em $z=0.28$ m para $\rho_1 > \rho_2$ e $\eta_r = 4.10e-04$.

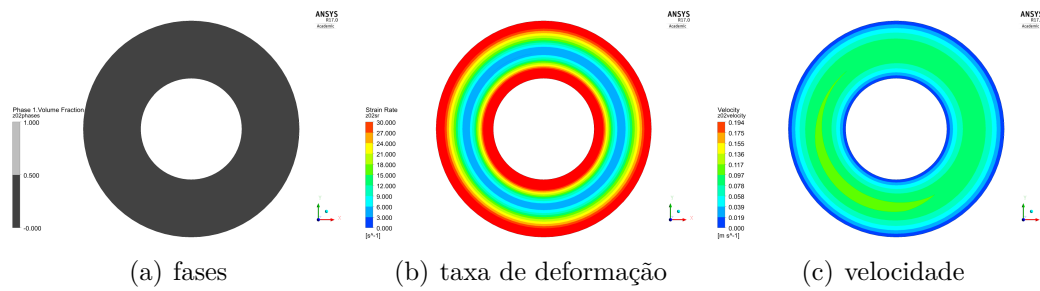


Figura 4.53: Campos numéricos para corte transversal em $z=0.31$ m para $\rho_1 > \rho_2$ e $\eta_r = 4.10e-04$.

Os gráficos apresentados na fig.4.54 mostram a curva de eficiência de deslocamento para os casos simulados. A curva de eficiência para $\rho_1 = \rho_2$ (fig.4.54(a)) mostra que o melhor deslocamento ocorre para a menor razão de viscosidade ($\eta_r = 2.75e-04$). Quando a densidade do fluido deslocador é maior ($\rho_1 > \rho_2$) ocorre o inverso, o aumento da razão de viscosidade melhora a eficiência de deslocamento (fig.4.54(b)).

Este comportamento, em que o fluido menos denso desloca o fluido mais denso, e aumento de eficiência com o aumento das vazões de bombeio, é observado em casos reais da de completação e cimentação de poços.

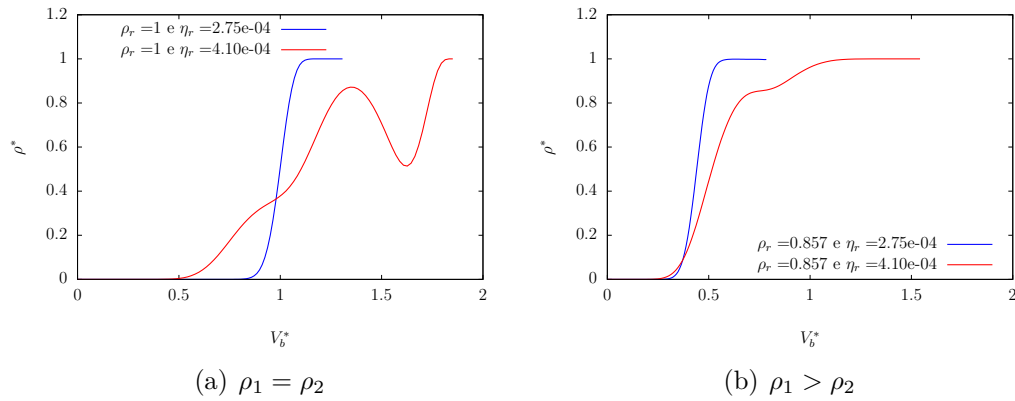


Figura 4.54: Curva de eficiência de deslocamento para os casos estudados.

4.4.3

Fluido viscoplástico

A seguir serão apresentados os resultados numéricos do deslocamento de um fluido viscoplástico por um fluido newtoniano. O fluido deslocador tem as propriedades da glicerina 60%, $\rho = 1163.6 \text{ kg/m}^3$ e $\mu = 0.01195 \text{ Pa.s}$. O fluido viscoplástico é modelado pela equação de *Herschel-Bulkley*. As propriedades do fluido viscoplástico são: $\tau_y = 2.58 \text{ kPa}$, $k = 119.72 \text{ Pa.s}^n$ e $n = 0.50342$.

Foram analisados diferentes números de Reynolds, $Re = 49$ e $Re = 116$. Para esses casos a posição do anular é concêntrica e vertical. Os campos de fração volumétrica, taxa de deformação e velocidade destes casos são apresentados pelas figs. 4.55 e 4.56. Para $Re = 49$, o formato da interface é mais achatado do que o caso para $Re = 116$. A interface mais achatada facilita o deslocamento entre os fluidos. Em ambos os casos é possível observar que uma camada do fluido viscoplástico fica no interior do anular próximo as paredes, e que a mesma cresce quando o número de Reynolds aumenta. A formação desta camada de fluido, que permanece estagnada ao longo do escoamento, se deve a tensão limite de escoamento. As tensões geradas pelo processo de deslocamento não são suficientes para ultrapassar a tensão limite de escoamento, fazendo com que o fluido a ser deslocado não se movimente. Assim, fluido viscoplástico é removido apenas parcialmente do interior do anular.

O efeito do número de Reynolds no processo de deslocamento foi investigado, a partir da simulação do escoamento para Re iguais a 49, 116, 203, 600 e 1000. As razões de viscosidade para os casos são apresentadas pela tab. 4.13. Em todos os casos, $\eta_r \ll 1$.

O gráfico apresentado na fig. 4.57 apresenta o resultado do deslocamento do fluido viscoplástico pelo fluido newtoniano para os diferentes Re . Para todos os casos é observado a formação de *finger*. Além disso, $\rho^* < 1$ indicando que uma quantidade de fluido viscoplástico não foi removida, isto é, uma camada de

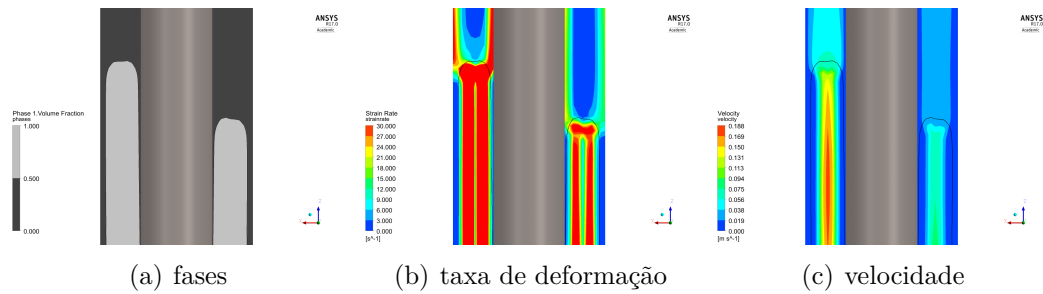


Figura 4.55: Campos numéricos em plano axial do deslocamento de um fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $Re=49$.

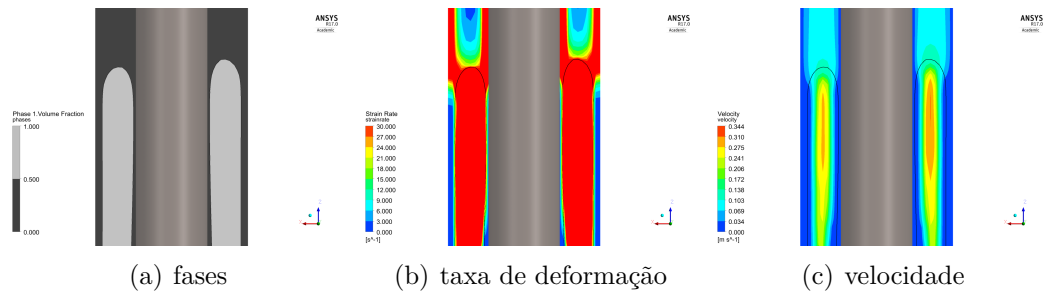


Figura 4.56: Campos numéricos em plano axial do deslocamento de um fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $Re=116$.

Re	η_c	η_r	τ_c	τ_y^*
49	601.85	1.99E-05	7419.89	0.38
116	327.49	3.65E-05	9522.60	0.29
203	204.86	5.83E-05	11895.60	0.24
600	110.81	1.08E-04	16542.79	0.17
1000	80.26	1.49E-04	19987.11	0.14

Tabela 4.13: Razão de viscosidades para o fluido viscoplástico.

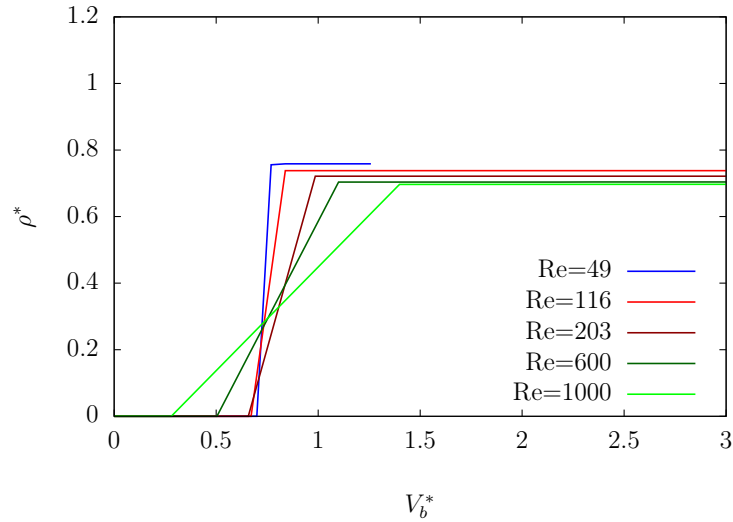
fluido fica remanescente nas regiões próximas as paredes do anular. O aumento do Re proporciona uma queda na eficiência de deslocamento.

Para investigar o efeito da tensão limite de escoamento, foram analisados casos com fluido newtoniano deslocando um fluido viscoplástico. Foram mantidos fixos os valores de $k=119.72 \text{ Pa.s}^n$ e $n=0.50342$, variando-se a tensão limite de escoamento ($\tau_y = 6 \text{ kPa}$ e 10 kPa). Foram realizadas simulações para $Re=116$, anular concêntrico e excêntrico, vertical e inclinado. A tabela 4.14 apresenta os parâmetros das simulações.

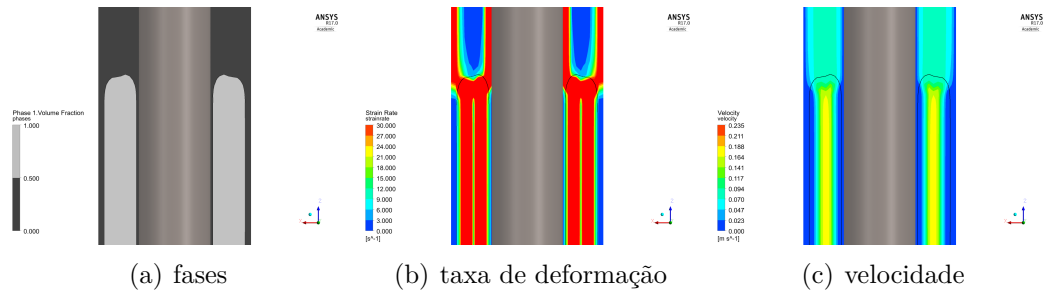
Re	η_c	η_r	τ_y	τ_c	τ_y^*
116	437.60	2.73E-05	6 kPa	12724,50	0,47
116	575.17	2.08E-05	10 kPa	16724,50	0,60

Tabela 4.14: Parâmetros das simulações.

Os resultados para o caso com $\tau_y = 6 \text{ kPa}$ para o poço concêntrico e

Figura 4.57: Carbopol variando Re .

vertical são apresentados nas figs.4.58, 4.59, 4.60, 4.61 e 4.62. Os campos numéricos apresentados mostram que uma camada de fluido viscoplastico permanece no interior do anular e a camada da parede interna é mais fina que a da parede externa, pois as tensões na parede externa são menores do que na parede interna. Como dito anteriormente, as tensões impostas ao fluido não são suficientes para ultrapassar a tensão limite de escoamento do fluido, ocasionando estas camadas de fluido residual, que reduzem a eficiência do processo de deslocamento.

Figura 4.58: Campos numéricos em plano axial do deslocamento de um fluido viscoplastico pela glicerina 60% para $\tau_y = 6$ kPa na posição concêntrica e vertical.

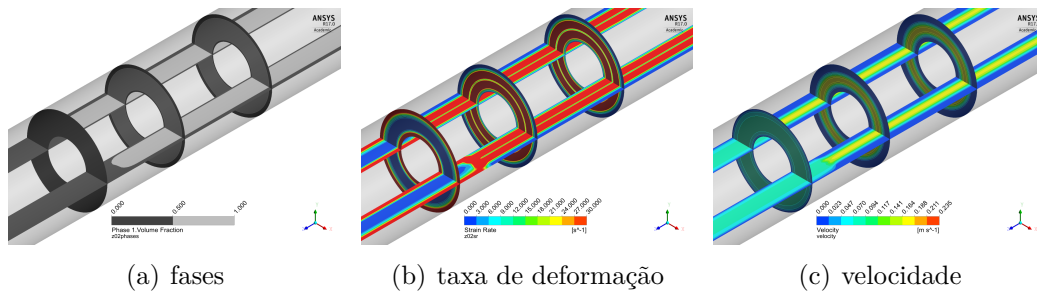


Figura 4.59: Campos numéricos em planos transversais do deslocamento do fluido viscoplastico pela glicerina 60% para $\tau_y = 6$ kPa na posição concêntrica e vertical.

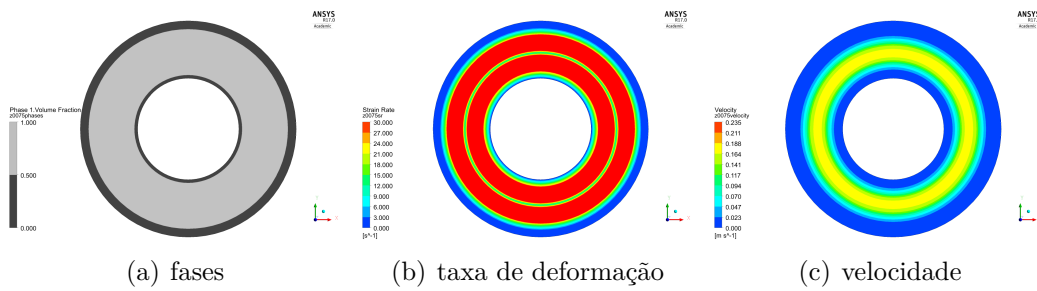


Figura 4.60: Campos numéricos no plano transversal $z=0.25$ m do deslocamento do fluido viscoplastico pela glicerina 60% para $\tau_y = 6$ kPa na posição concêntrica e vertical.

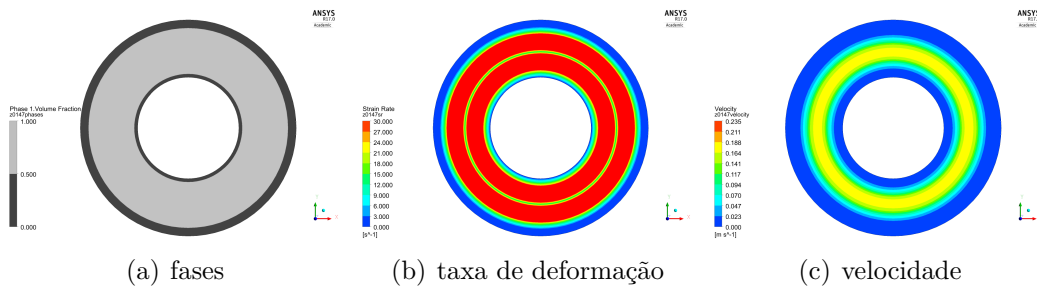


Figura 4.61: Campos numéricos no plano transversal $z=0.28$ m do deslocamento do fluido viscoplastico pela glicerina 60% para $\tau_y = 6$ kPa na posição concêntrica e vertical.

Os resultados para o caso com $\tau_y = 10$ kPa em que o poço é concêntrico e vertical são apresentados nas figs.4.63, 4.64, 4.65, 4.66 e 4.67. O mesmo formato de interface e a mesma camada de Carbopol observada nas paredes externa e interna para o caso com a $\tau_y = 6$ kPa é observada. Porém a espessura dessa camada é menor para a maior tensão limite.

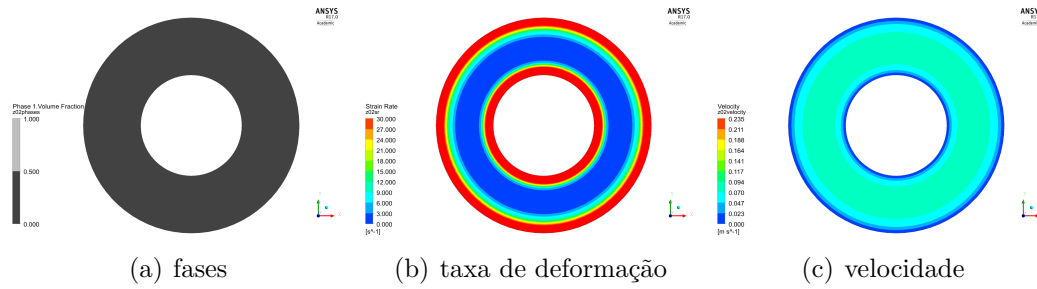


Figura 4.62: Campos numéricos no plano transversal $z=0.31\text{ m}$ do deslocamento do fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $\tau_y = 6\text{ kPa}$ na posição concêntrica e vertical.

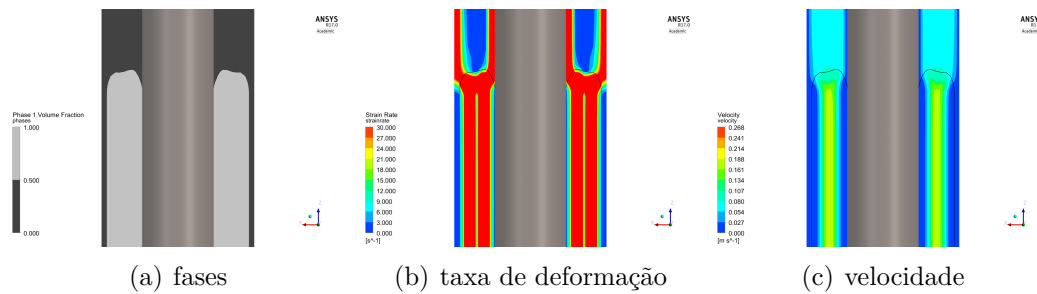


Figura 4.63: Campos numéricos em plano axial do deslocamento de um fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $\tau_y = 10\text{ kPa}$ na posição concêntrica e vertical.

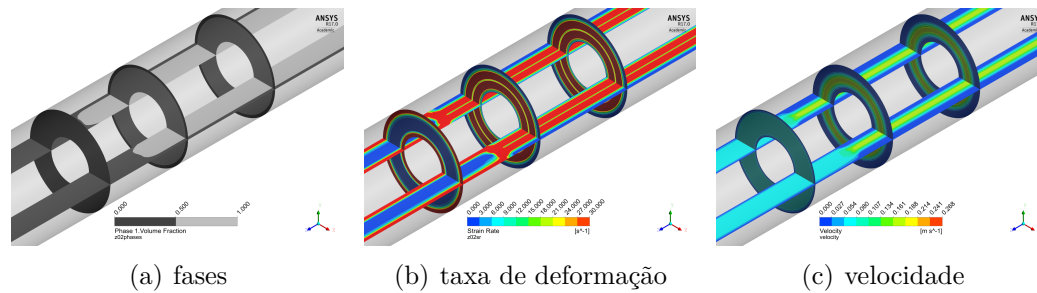


Figura 4.64: Campos numéricos em planos transversais do deslocamento do fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $\tau_y = 10\text{ kPa}$ na posição concêntrica e vertical.

No caso com $\tau_y = 6\text{ kPa}$ para o poço excêntrico e vertical observa-se que o fluido viscoplástico escoar em sua maioria pela região de maior área como mostram as figs.4.68, 4.69, 4.70, 4.71 e 4.72. As regiões mais estreitas são regiões de menor tensão e portanto maior dificuldade para vencer a tensão limite de escoamento.

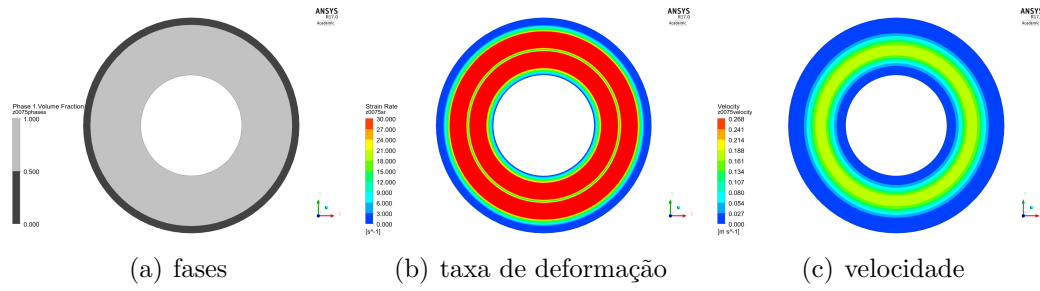


Figura 4.65: Campos numéricos no plano transversal $z=0.25\text{m}$ do deslocamento do fluido viscoplastico pela glicerina 60% para $\tau_y = 10\text{ kPa}$ na posição concêntrica e vertical.

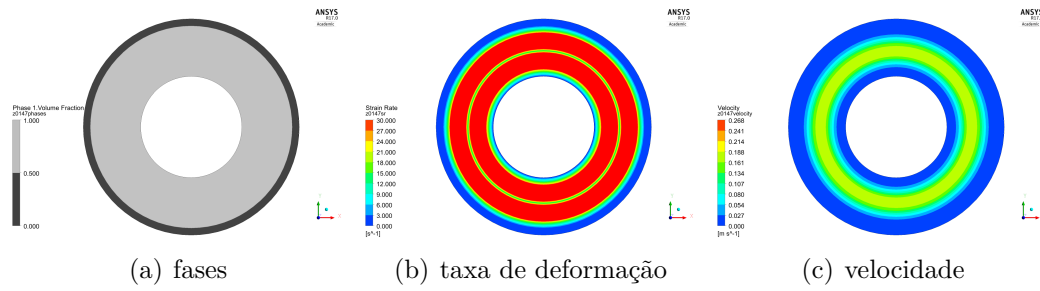


Figura 4.66: Campos numéricos no plano transversal $z=0.28\text{m}$ do deslocamento do fluido viscoplastico pela glicerina 60% para $\tau_y = 10\text{ kPa}$ na posição concêntrica e vertical.

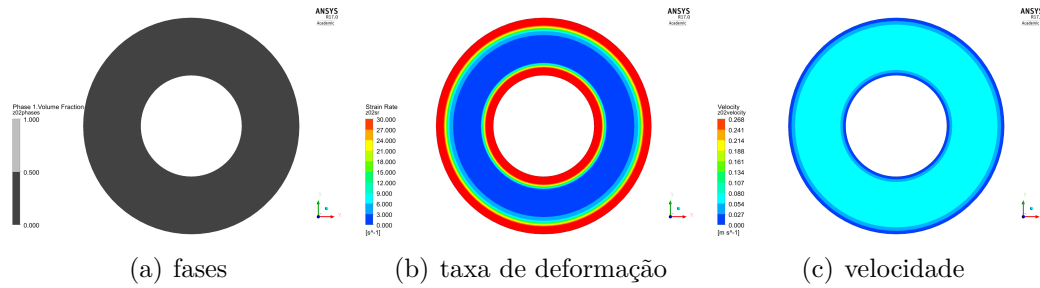


Figura 4.67: Campos numéricos no plano transversal $z=0.31\text{m}$ do deslocamento do fluido viscoplastico pela glicerina 60% para $\tau_y = 10\text{ kPa}$ na posição concêntrica e vertical.

O mesmo comportamento é observado o caso com $\tau_y = 10\text{ kPa}$ para o poço excêntrico e vertical. As figs.4.73, 4.74, 4.75, 4.76 e 4.77 apresentam esses resultados.

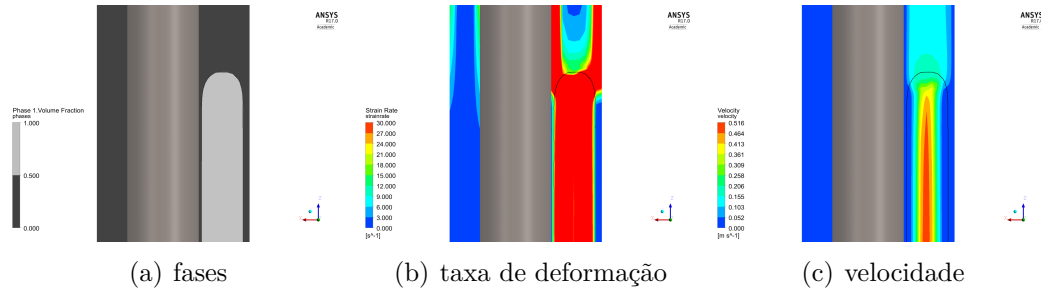


Figura 4.68: Campos numéricos em plano axial do deslocamento de um fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $\tau_y = 6$ kPa na posição excêntrica e vertical.

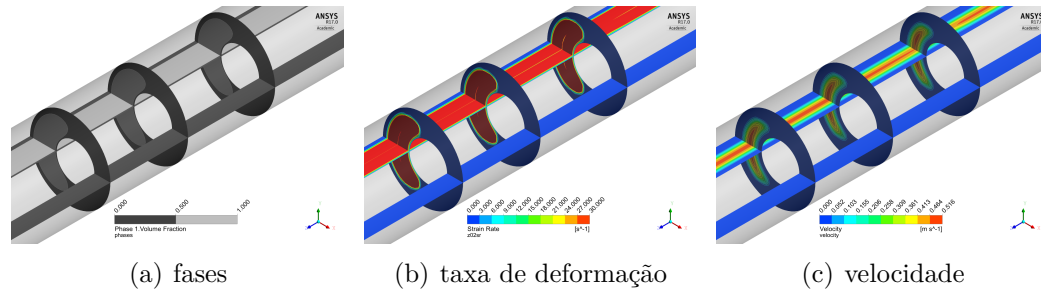


Figura 4.69: Campo numéricos em planos transversais do deslocamento do fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $\tau_y = 6$ kPa na posição excêntrica e vertical.

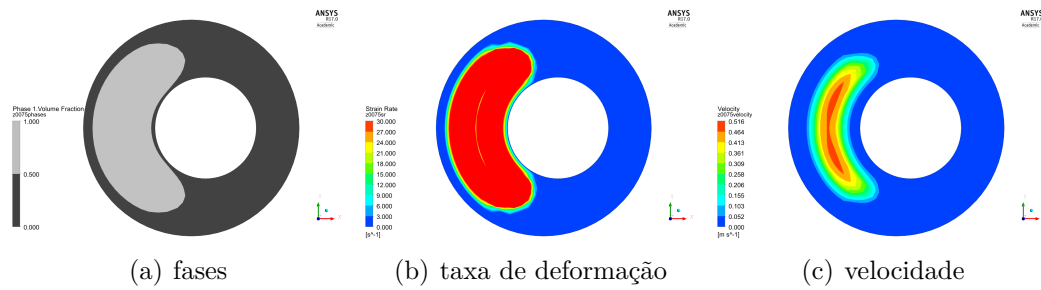


Figura 4.70: Campos numéricos no plano transversal $z=0.25$ m do deslocamento do fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $\tau_y = 6$ kPa na posição excêntrica e vertical.

Os resultados para o caso com $\tau_y = 10$ kPa para o poço concêntrico e inclinado são similares ao resultado obtido no caso concêntrico como mostra as figs.4.78, 4.79, 4.80, 4.81 e 4.82.

Os resultados mostram que o formato da interface não foi modificada com o aumento do valor da tensão limite de escoamento. No entanto, ao aumentar a tensão limite a espessura de fluido viscoplástico próximo as paredes do anular diminui. Nos casos excêntricos uma grande quantidade de fluido viscoplástico fica canalizada na região mais estreita do anular, e não é removido, pois as tensões não são suficientes para ultrapassar a tensão limite de escoamento.

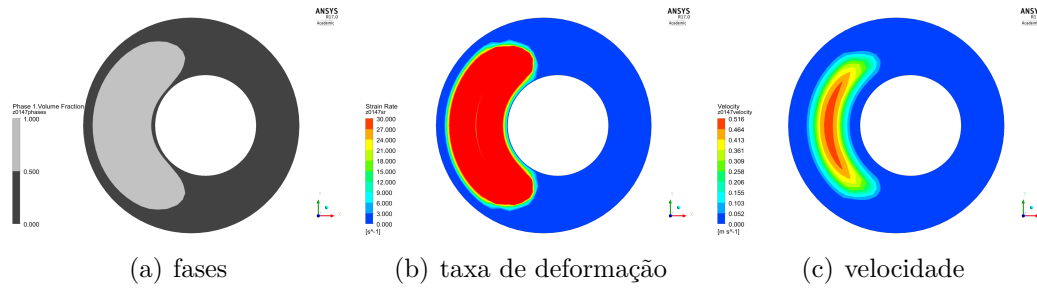


Figura 4.71: Campos numéricos no plano transversal $z=0.28\text{m}$ do deslocamento do fluido viscoplastico pela glicerina 60% para $\tau_y = 6\text{ kPa}$ na posição excêntrica e vertical.

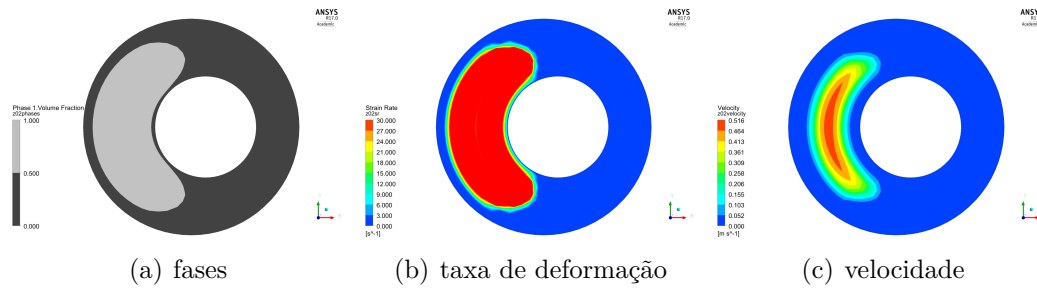


Figura 4.72: Campos numéricos no plano transversal $z=0.31\text{m}$ do deslocamento do fluido viscoplastico pela glicerina 60% para $\tau_y = 6\text{ kPa}$ na posição excêntrica e vertical.

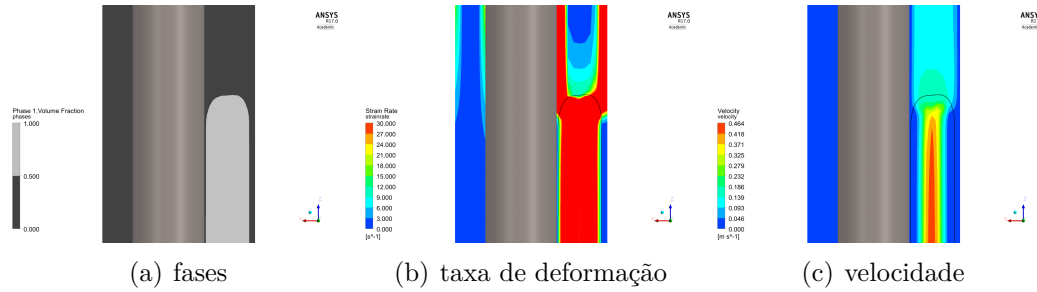


Figura 4.73: Campos numéricos em plano axial do deslocamento de um fluido viscoplastico pela glicerina 60% para $\tau_y = 10\text{ kPa}$ na posição excêntrica e vertical.

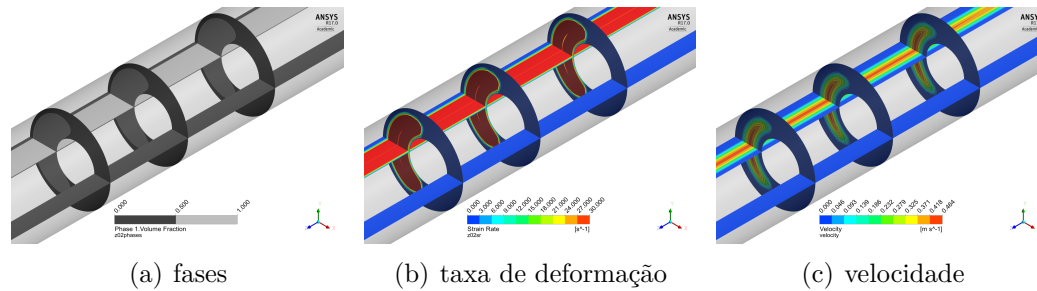


Figura 4.74: Campos numéricos em planos transversais do deslocamento de um fluido viscoplastico para $\tau_y = 10\text{ kPa}$ na posição excêntrica e vertical.

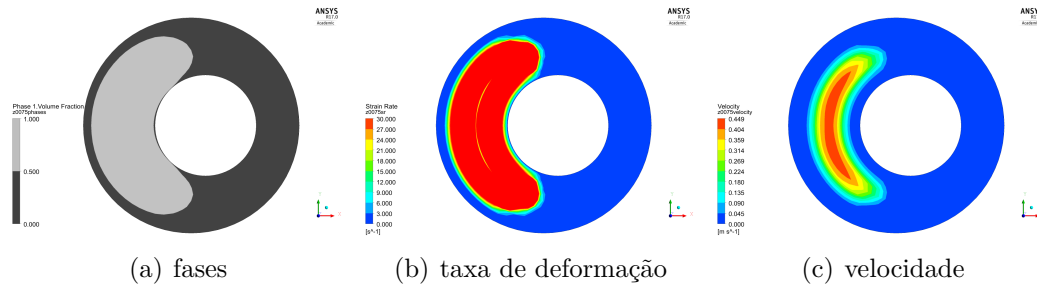


Figura 4.75: Campos numéricos no plano transversal $z=0.25$ m do deslocamento de um fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $\tau_y = 10$ kPa na posição excêntrica e vertical.

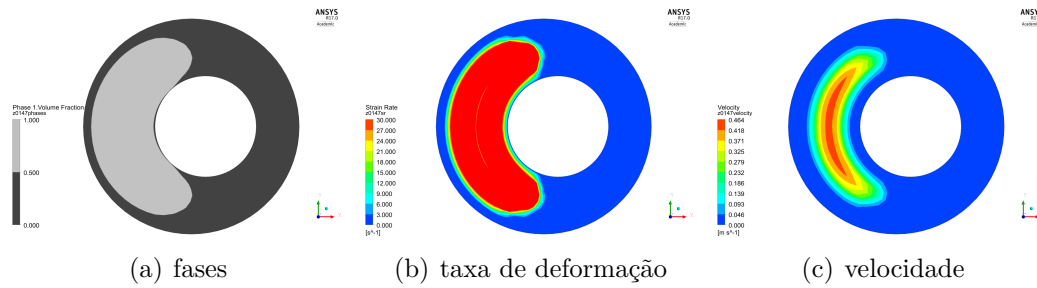


Figura 4.76: Campos numéricos no plano transversal $z=0.28$ m do deslocamento de um fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $\tau_y = 10$ kPa na posição excêntrica e vertical.

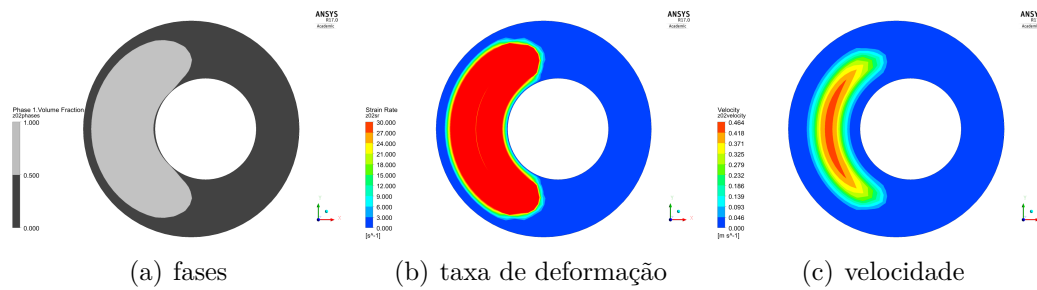


Figura 4.77: Campos numéricos no plano transversal $z=0.31$ m do deslocamento de um fluido viscoplástico pela glicerina 60% para $\tau_y = 10$ kPa na posição excêntrica e vertical.

Para a tensão limite de escoamento igual a 10 kPa, a espessura da camada de fluido estagnado próxima a parede interna diminui. Finalmente, observa-se que os melhores deslocamentos ocorrem para os casos concêntricos, tanto vertical quanto inclinado.

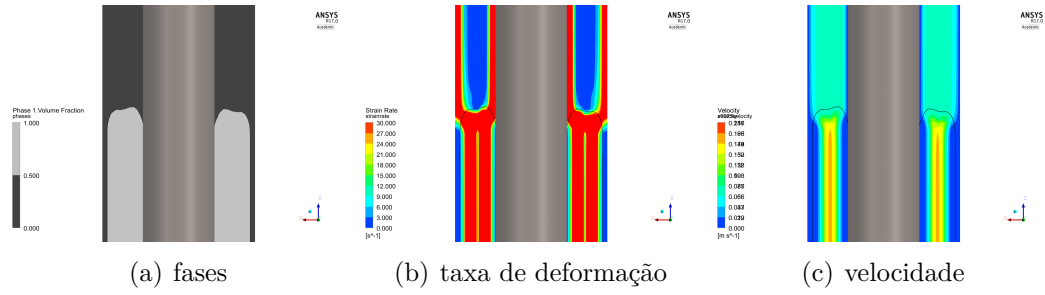


Figura 4.78: Glicerina 60% deslocando fluido viscoplástico para $\tau_y = 10 \text{ kPa}$, concêntrico e inclinado.

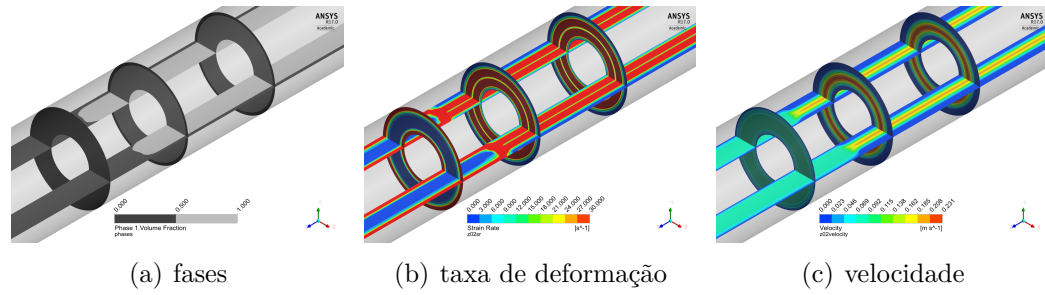


Figura 4.79: Campos numéricos em planos transversais do deslocamento de um fluido viscoplástico para $\tau_y = 10 \text{ kPa}$ na posição concêntrica e inclinado.

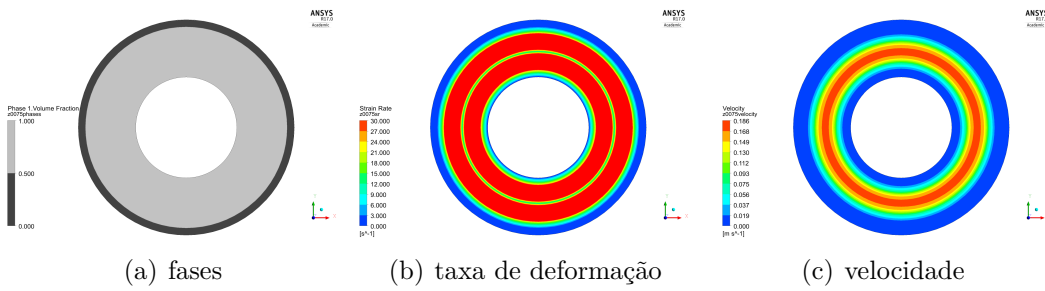


Figura 4.80: Campos numéricos no plano transversal $z=0.25 \text{ m}$ do deslocamento de um fluido viscoplástico para $\tau_y = 10 \text{ kPa}$ na posição concêntrica e inclinado.

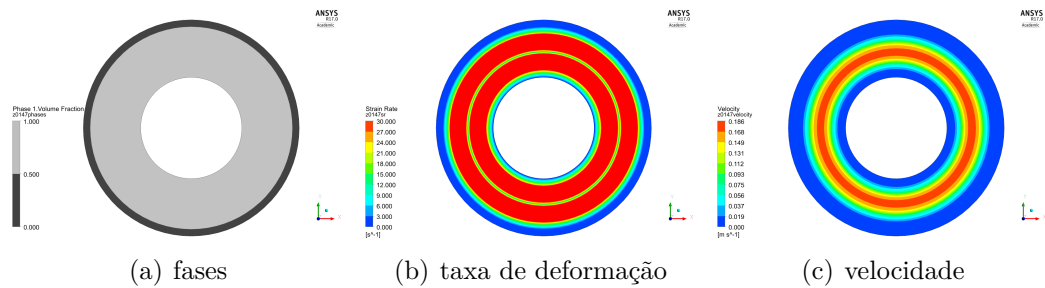


Figura 4.81: Campos numéricos no plano transversal $z=0.28 \text{ m}$ do deslocamento de um fluido viscoplástico para $\tau_y = 10 \text{ kPa}$ na posição concêntrica e inclinado.

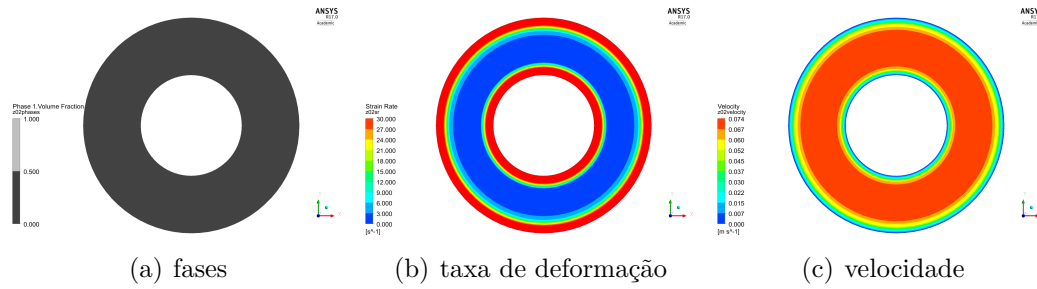


Figura 4.82: Campos numéricos no plano transversal $z=0.31\text{ m}$ do deslocamento de um fluido viscoplástico para $\tau_y = 10\text{ kPa}$ na posição concêntrica e inclinado.

4.4.4

Dois fluidos viscoplásticos

Casos numéricos considerando dois fluidos viscoplásticos foram realizados com o objetivo de analisar a influência razão entre as tensões limite de escoamento e razão de densidades na eficiência de deslocamento. Para todos os casos foi considerado um poço concêntrico e vertical com a mesma vazão de bombeio.

No primeiro caso estudado, a densidade dos fluidos deslocado e deslocador são iguais, e a tensão limite de escoamento do fluido deslocador é o dobro da tensão limite do fluido deslocado ($\rho_1 = \rho_2$ e $\tau_1 < \tau_2$). No segundo caso, a densidade do fluido deslocado é maior que a do fluido deslocador e as tensões limite de escoamento são iguais ($\rho_1 > \rho_2$ e $\tau_1 = \tau_2$). No terceiro caso, a densidade do fluido deslocador continua maior que a do fluido deslocado e a tensão limite do fluido deslocador é 50% maior que a do fluido deslocado. No quarto caso a densidade do fluido deslocado também é maior que a do fluido deslocador e a tensão limite do fluido deslocador é 50% maior que a do fluido deslocado.

Para um melhor entendimento dos casos estudados, serão apresentados cortes transversais dos campos de fração volumétrica, taxa de deformação e velocidade. Juntamente, cortes transversais ao escoamento serão apresentados em três posições ao longo do duto para uma melhor análise do deslocamento.

casos	η_{c1}	η_{c2}	η_r	ρ_r	Re	ϵ_f
$\rho_1 = \rho_2$ e $\tau_{y1} < \tau_{y2}$	0.33	0.44	1.31	1.00	2.80	93%
$\rho_1 > \rho_2$ e $\tau_{y1} = \tau_{y2}$	0.33	0.33	1.00	0.67	2.80	89%
$\rho_1 > \rho_2$ e $\tau_{y1} < \tau_{y2}$	0.33	0.44	1.31	0.67	3.60	90%
$\rho_1 > \rho_2$ e $\tau_{y1} > \tau_{y2}$	0.44	0.33	0.76	0.67	3.60	88%

Tabela 4.15: Dados dos casos estudados.

A tabela 4.15 apresenta as viscosidades características de cada fluido e

as razões de densidade e viscosidade dos casos, o número de Re e a eficiência de deslocamento para cada caso.

O resultado da eficiência de deslocamento para os casos é apresentado na fig.4.83. A eficiência dos casos foi 93% para o primeiro, 89% para o segundo, 90% para o terceiro e 88% para o quarto. Os casos de maior eficiência são os que apresentam maior razão de viscosidade. Observando os campos de fração volumétrica, nota-se que quanto maior a razão de viscosidade mais pontiagudo é o formato da interface, que apresenta também mais instabilidades na superfície. Os casos de menor eficiência possuem a menor razão de viscosidade e *fingers* mais espessos. Analisando a influência da inércia, observa-se que para um maior Re ocorre uma queda na eficiência de deslocamento dos casos.

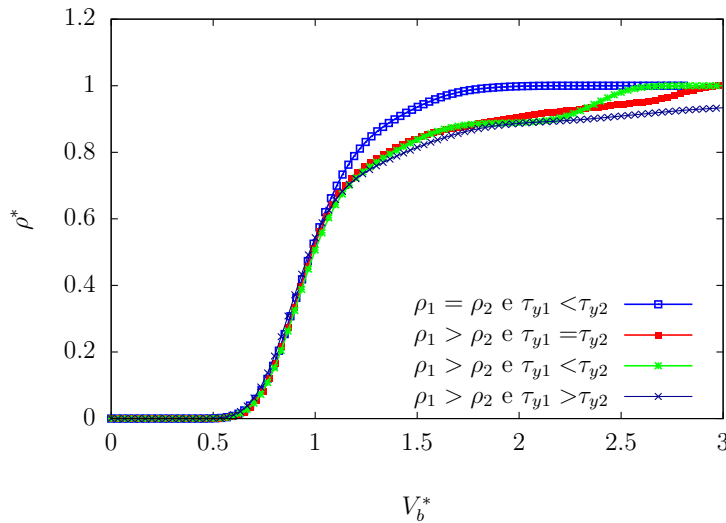


Figura 4.83: Curva da eficiência de deslocamento para os casos estudados.

Os campos numéricos para o caso $\rho_1 = \rho_2$, $\tau_{y1} < \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1.31$, em um plano axial são apresentados na fig.4.84. A fig.4.84(a) mostra o campo de fração volumétrica e a interface entre os fluidos, que tem o formato de um *finger* fino e ondulado. A taxa de deformação é maior na região próxima as paredes (fig.4.84(b)) e a velocidade é máxima no centro (fig.4.84(c)). A fig.4.85 mostra os cortes transversais em $z=0.25$ m, 0.28 m e 0.31 m para fração volumétrica, taxa de deformação e velocidade.

No segundo caso estudado ($\rho_1 > \rho_2$ e $\tau_1 < \tau_2$), a densidade do fluido deslocador é 50% menor que a do fluido deslocado, a tensão limite de escoamento dos dois fluidos é igual e $\eta_r = 1$. A fig.4.89 apresenta os campos numéricos em um plano axial da fração volumétrica, taxa de deformação e velocidade. A interface entre os fluidos é um *finger* de formato mais arredondado e ondulado

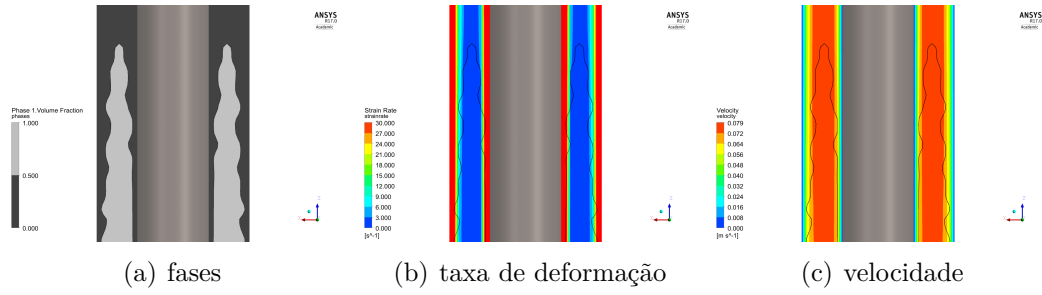


Figura 4.84: Campos numéricos em plano axial para $\rho_1 = \rho_2$, $\tau_{y1} < \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1.31$.

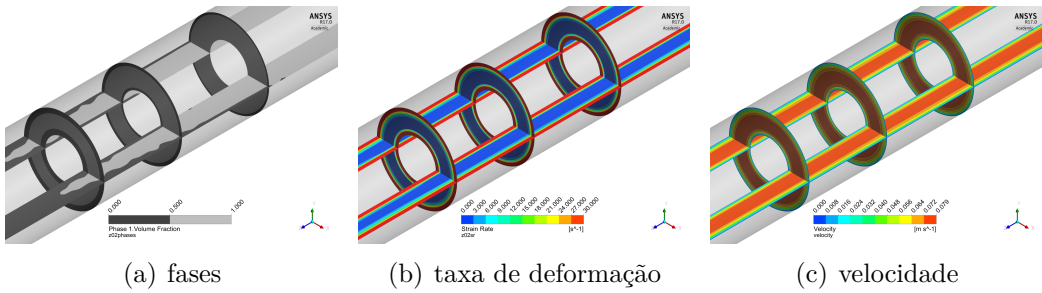


Figura 4.85: Campos numéricos em planos transversais para $\rho_1 = \rho_2$, $\tau_{y1} < \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1.31$.

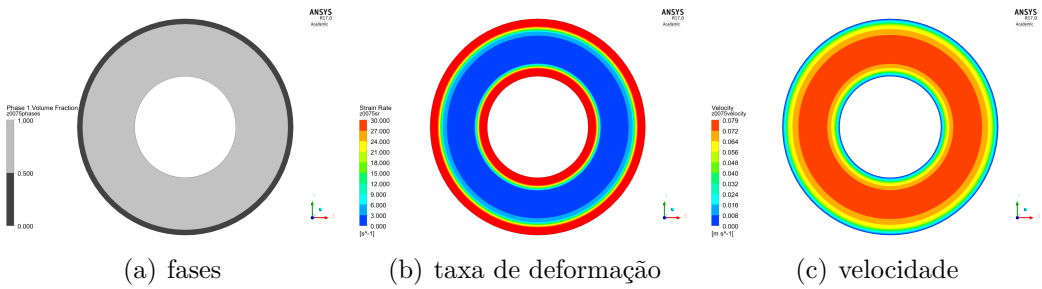


Figura 4.86: Campos numéricos no plano transversal $z=0.25$ m para $\rho_1 = \rho_2$, $\tau_{y1} < \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1.31$.

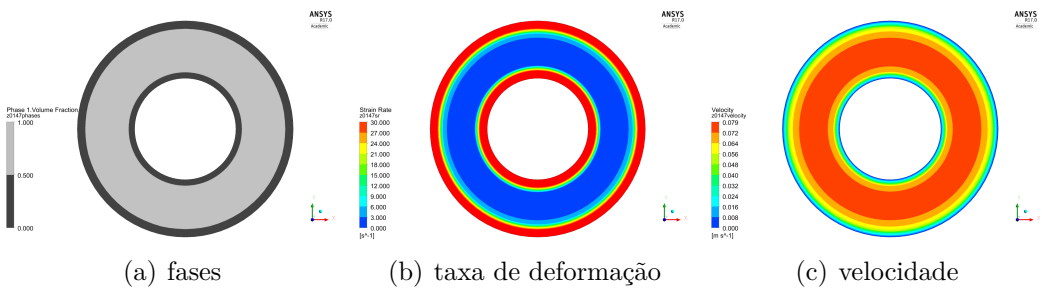


Figura 4.87: Campos numéricos no plano transversal $z=0.28$ m para $\rho_1 = \rho_2$, $\tau_{y1} < \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1.31$

nas laterais (fig.4.89(a)), com menos instabilidades na superfície. Observa-se então que a força gravitacional age no sentido de estabilizar o deslocamento.

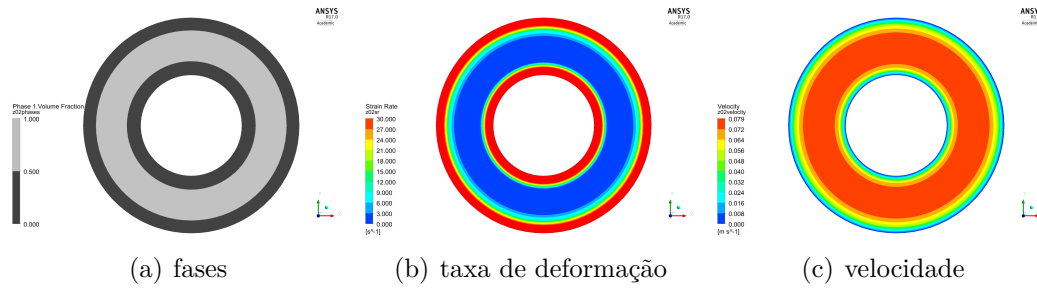


Figura 4.88: Campos numéricos no plano transversal $z=0.31$ m para $\rho_1 = \rho_2$, $\tau_{y1} < \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1.31$.

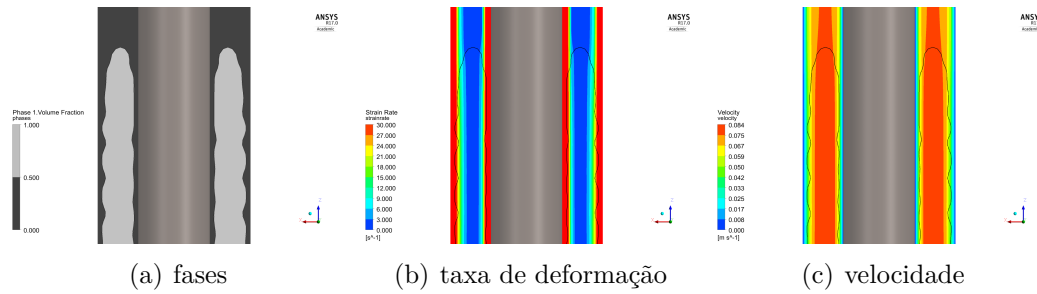


Figura 4.89: Campos numéricos em plano axial para $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} = \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1$.

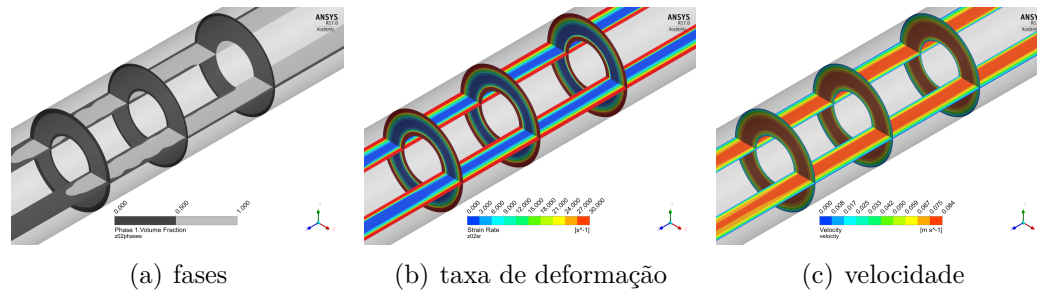


Figura 4.90: Campos numéricos em planos transversais para $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} = \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1$.

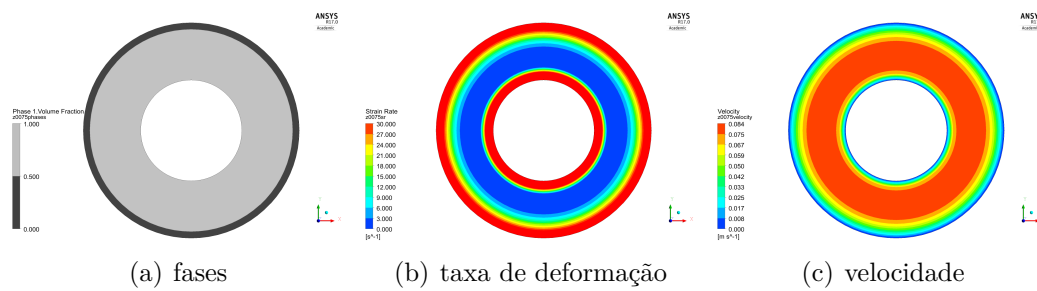


Figura 4.91: Campos numéricos no plano transversal $z=0.25$ m para $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} = \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1$.

Quando $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} < \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1.31$ o formato da interface volta ser um *finger* mais fino, mas com menos ondulações (instabilidades) que o primeiro. O campo de fração volumétrica é apresentado na fig.4.94(a). Os campos de taxa

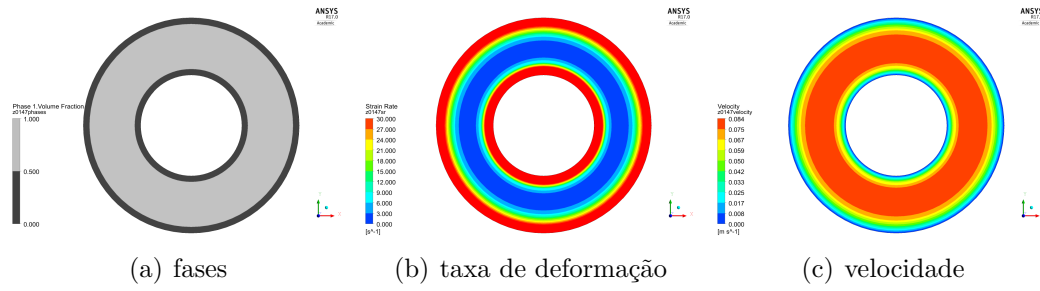


Figura 4.92: Campos numéricos no plano transversal $z=0.28$ m para $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} = \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1$.

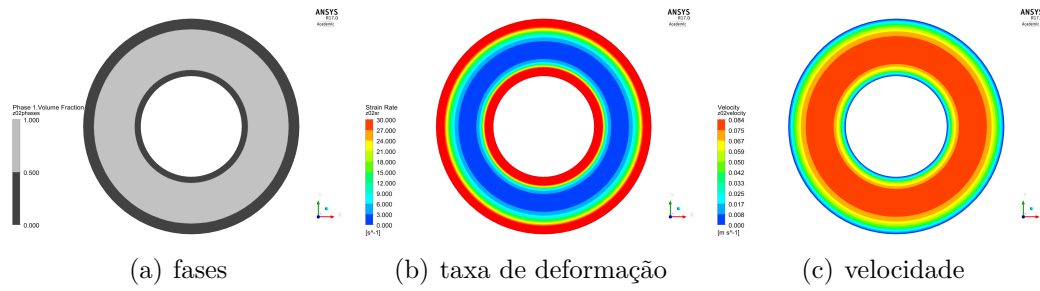


Figura 4.93: Campos numéricos no plano transversal $z=0.31$ m para $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} = \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1$.

de deformação e velocidade são apresentados nas figs.4.94(b) e 4.94(c).

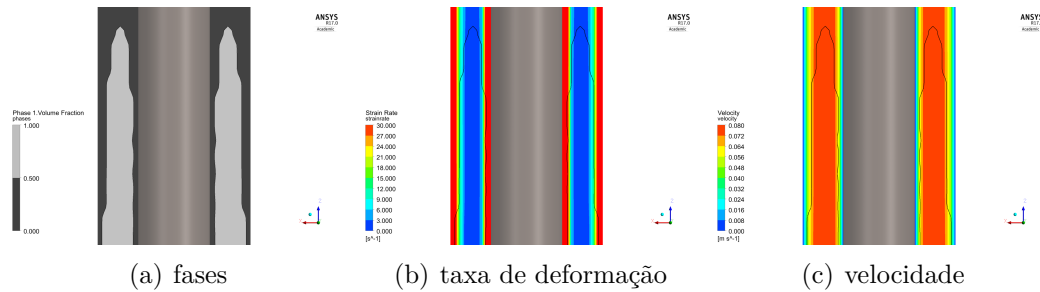


Figura 4.94: Campo numérico em plano axial para $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} < \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1.31$.

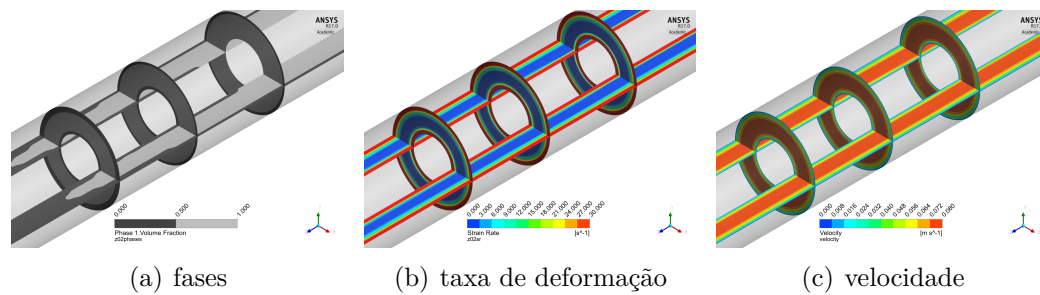


Figura 4.95: Campos numéricos em plano transversal para $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} < \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1.31$.

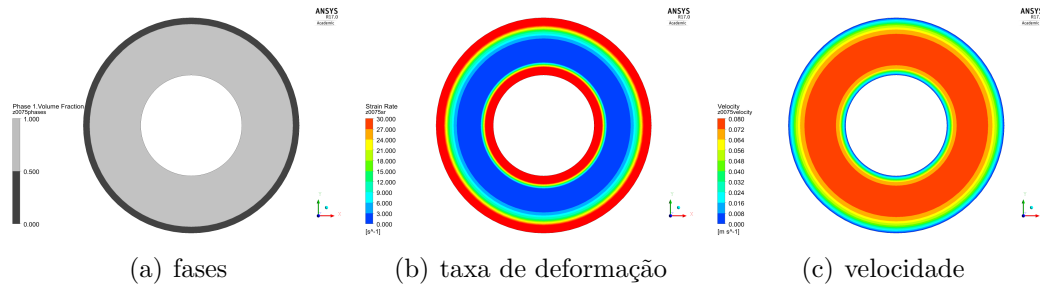


Figura 4.96: Campos numéricos no plano transversal $z=0.25$ m para $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} < \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1.31$.

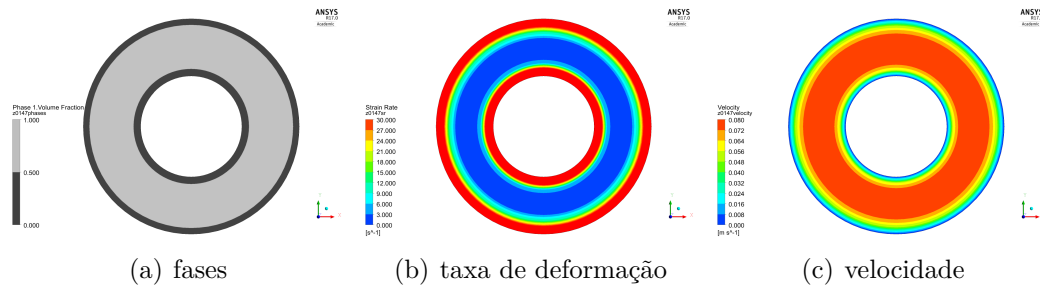


Figura 4.97: Campos numéricos no plano transversal $z=0.28$ m para $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} < \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1.31$.

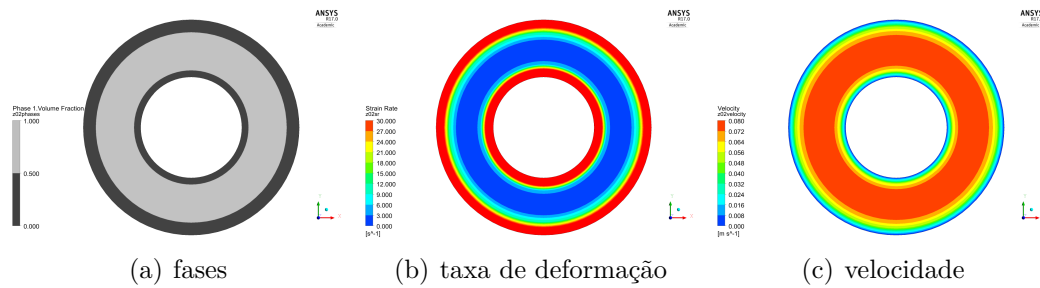


Figura 4.98: Campos numéricos no plano transversal $z=0.31$ m para $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} < \tau_{y2}$ e $\eta_r = 1.31$.

O último caso analisado, $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} > \tau_{y2}$ e $\eta_r = 0.76$, mostra uma interface mais plana e menos ondulada (mais estável), indicando que o deslocamento é mais eficiente quando o fluido deslocado tem maior tensão limite de escoamento e maior viscosidade. Este resultado é qualitativamente similar aos casos newtonianos. A fig.4.99 apresenta os campos de fração volumétrica, taxa de deformação e velocidade para um plano axial.

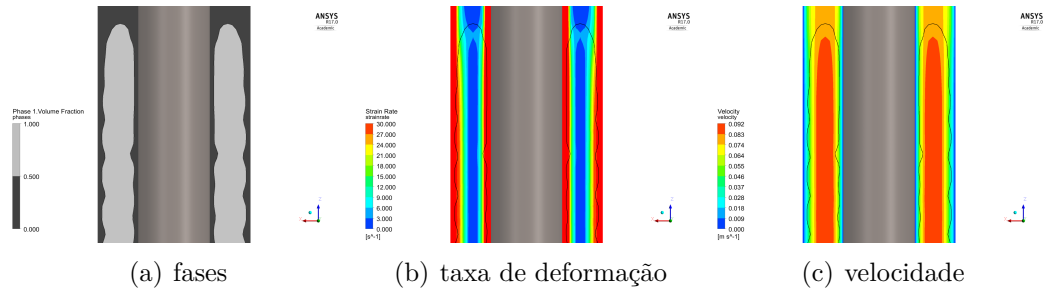


Figura 4.99: Campos numéricos em plano axial para $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} > \tau_{y2}$ e $\eta_r = 0.76$.

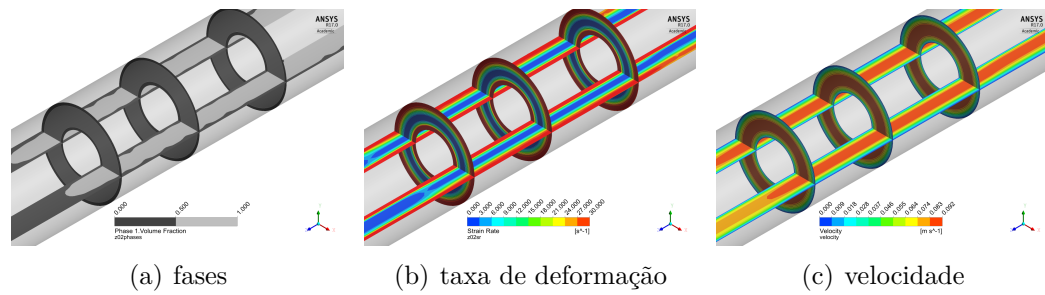


Figura 4.100: Campos numéricos em planos transversais para $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} > \tau_{y2}$ e $\eta_r = 0.76$.

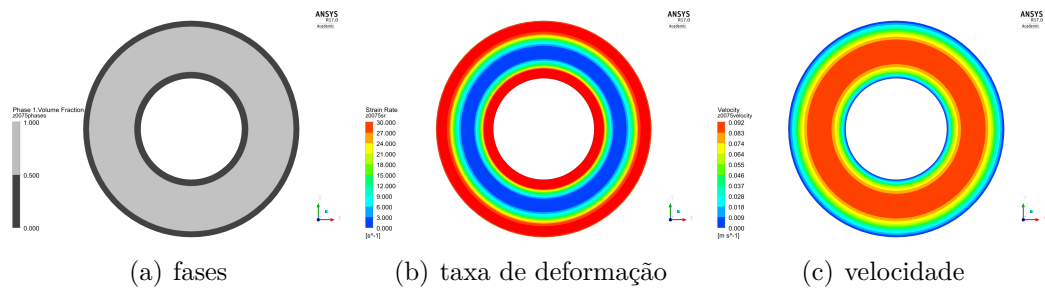


Figura 4.101: Campos numéricos no plano transversal $z=0.25$ m para $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} > \tau_{y2}$ e $\eta_r = 0.76$.

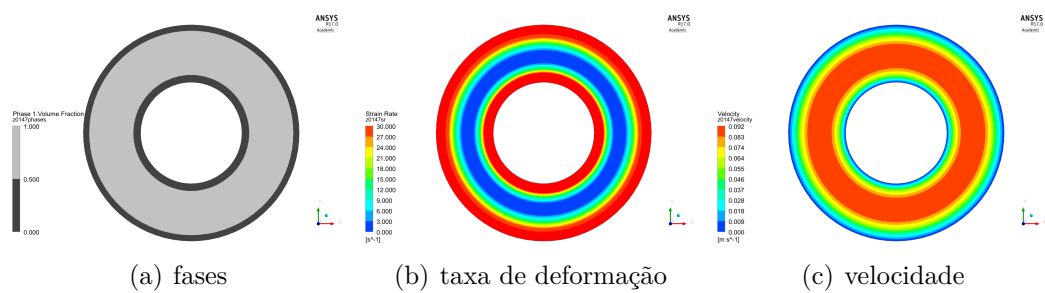


Figura 4.102: Campos numéricos no plano transversal $z=0.28$ m para $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} > \tau_{y2}$ e $\eta_r = 0.76$.

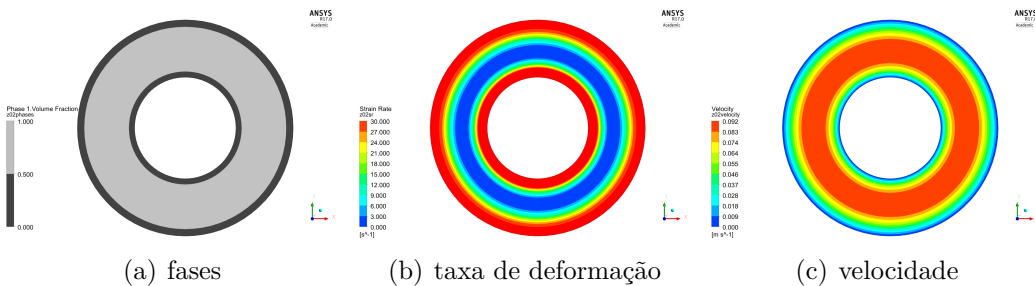


Figura 4.103: Campos numéricos no plano transversal $z=0.31$ m para $\rho_1 > \rho_2$, $\tau_{y1} > \tau_{y2}$ e $\eta_r = 0.76$.

Um simulador físico de um poço de petróleo em escala foi desenvolvido para o estudo do deslocamento de um fluido por outro em espaços anulares concêntrico e excêntrico. O deslocamento de um fluido pelo outro está presente em diversos processos industriais. Neste trabalho o foco foi o deslocamento de fluidos durante as operações de perfuração, completação e cimentação. Nestas situações, os fluidos envolvidos podem apresentar comportamento não newtoniano, em geral pseudoplástico, viscoplástico ou até tixotrópico. O objetivo dessa investigação foi analisar a influência dos parâmetros que governam o escoamento no processo de deslocamento. Os principais parâmetros analisados são razões de densidade e viscosidade dos fluidos, parâmetros reológicos dos fluidos não newtonianos, configurações da geometria do poço (concêntrico ou excêntrico e vertical ou inclinado) e vazão de bombeio. Todos esses parâmetros tem influência direta na forma da interface entre os fluidos e conseqüentemente na eficiência do processo de deslocamento dos fluidos. A partir de uma análise completa, é possível obter dados para uma otimização do processo de deslocamento, garantindo máxima eficiência e o sucesso na operação de cimentação do poço.

No presente estudo foram realizadas análises experimentais e numéricas para diferentes pares de fluidos. Foram utilizados fluidos modelos newtonianos e não newtonianos (soluções de glicerina, goma xantana, Carbopol® e Laponita® e fluidos reais (fluidos de perfuração e n-parafina) para avaliar a eficiência de deslocamento. As vazões de bombeio e configurações de geometrias também foram variadas. Nas simulações numéricas foram utilizadas faixas diferentes de parâmetros, a fim de estender a aplicabilidade dos resultados. Para a solução das equações governantes foi utilizado o software de código aberto OpenFOAM. A análise da eficiência de deslocamento foi realizada através da curva de densidade adimensional da mistura em função do volume adimensional bombeado. Além disso, observações qualitativas da interface experimental e campos de fração volumétrica, velocidade e taxa de deformação dos casos numéricos foram utilizados na interpretação dos resultados.

Inicialmente foram analisados os escoamentos com pares de fluidos newtonianos. Com dois pares de fluidos newtonianos testados foi realizada a vali-

dação da seção de testes e do procedimento experimental. Observou-se também que a difusão para o par de fluidos miscíveis é desprezível pois o tempo de residência era pequeno, devido ao comprimento da tubulação e vazões utilizadas nos testes. O primeiro par de fluidos testado foi água e óleo soya, dois fluidos imiscíveis. A razão de densidade entre os fluidos é próxima da unidade. A água, fluido deslocador, é menos viscosa do que o óleo, assim nestes casos a razão de viscosidade foi bem menor do que a unidade. Os resultados mostram que a interface formada entre os dois fluidos é praticamente plana tendo eficiência de deslocamento acima de 90% em todos os casos. Os casos excêntricos e inclinados apresentaram eficiências menores. Um segundo par de fluidos, miscíveis, também foi testado, etilenoglicol deslocando água. Novamente, a razão de densidades é ligeiramente superior a unidade, mas neste caso o fluido deslocador é mais viscoso que a água ($\eta_r > 1$). Os resultados mostram que a eficiência de deslocamento destes casos é maior do que no caso anterior, sendo superior a 95% em todos os casos.

Os resultados com os pares de fluidos newtonianos foram obtidos para razões de densidade ligeiramente maiores do que a unidade. Nos casos em que $\eta_r < 1$, observou-se que o aumento de Re leva a um aumento na eficiência do processo de deslocamento. Foi possível também concluir que a excentricidade reduz a eficiência. Da mesma forma, a inclinação da tubulação leva a processos menos eficientes. Tanto a excentricidade quanto a inclinação da tubulação induzem a perda da simetria do escoamento, o que ocasiona interfaces mais instáveis e um processo de deslocamento menos eficiente.

A análise dos resultados dos processos de deslocamento com fluidos não newtonianos visou investigar o efeito da pseudoplasticidade, tensão limite de escoamento e tixotropia.

Independente do comportamento reológico, observou-se que o efeito da inclinação e da excentricidade é similar ao observado para os fluidos newtonianos, i.e., ambos levam a perda de simetria gerando interfaces mais instáveis e eficiências menores.

Os casos experimentais de fluido newtoniano deslocando o fluido pseudoplástico consideraram situações com razões de densidade um pouco maiores do que 1 (i.e., fluido deslocador um pouco mais denso do que o deslocado) e razões de viscosidade ($<$ ou ~ 1). Nestes casos, o aumento do número de Reynolds levou a um aumento na eficiência do processo. É importante notar que ao aumentar Re , a razão de viscosidade cresce, pois a viscosidade do fluido deslocado, com comportamento pseudoplástico, cai devido ao aumento das tensões e taxas de deformação. Na situação inversa, i.e., quando o fluido deslocador é pseudoplástico, verificou-se que o aumento da razão de viscosi-

dade também leva a uma melhora do processo de deslocamento e portanto maiores eficiências.

Nas simulações numéricas foram investigados casos em que o fluido deslocador era bem menos viscoso do que o deslocado ($\eta_r \ll 1$). Nestes casos, o aumento do Re leva a redução da eficiência, provavelmente porque embora a razão de viscosidades aumente, não aumenta o suficiente para reduzir as instabilidades causadas pelo efeito da inércia, que predomina nestas situações. Assim, maiores números de Reynolds implicam em processos de deslocamento menos eficientes. Nota-se que este comportamento é oposto ao obtido com fluidos newtonianos, indicando que o aumento na instabilidade da interface entre os fluidos depende da reologia.

O efeito da tensão limite de escoamento também foi investigado experimental e numericamente. Os resultados mostraram que a presença da tensão limite leva a formação de uma camada estagnada do fluido deslocado (viscoplástico), próximo às paredes da tubulação, pois as tensões geradas no escoamento não são suficientes para quebrar a estrutura do fluido. Assim, a eficiência do processo de deslocamento é menor do que nos casos em que o fluido deslocado é pseudoplástico. A influência do número de Reynolds novamente deve ser vista junto com a razão de viscosidade, além da tensão limite adimensional, $\tau_y^* = \tau_y/\tau_c$, onde τ_c é a tensão característica do escoamento. Assim, o aumento de τ_y^* leva a um aumento da camada estagnada e portanto, uma redução da eficiência. Nos casos experimentais, o aumento de Re levou a uma redução de τ_y^* e houve um pequeno aumento na eficiência. No entanto, nas simulações numéricas, a redução de τ_y^* e o aumento da camada residual, reduziu a eficiência de deslocamento. A causa desta diferença, ocorre provavelmente porque para os resultados experimentais $\eta_r < 1$ enquanto que para os resultados numéricos $\eta_r \ll 1$.

Os testes experimentais utilizando fluidos reais utilizaram a n-parafina (fluido com propriedades similares a da água, newtoniano) deslocando fluidos de perfuração (com comportamento viscoplástico). As razões de densidades são maiores do que um e as razões de viscosidade bem maiores do que um. Os resultados para os dois fluidos de perfuração mostraram que ocorre a canalização da n-parafina no fluido de perfuração, resultando em baixas eficiências. O aumento do número de Reynolds resultou em significativa queda da razão de viscosidade e consequente aumento na eficiência de deslocamento. O efeito da excêntricidade e da inclinação dos dutos foi qualitativamente similar ao obtido com os fluidos modelos, i.e., ambos atuando no sentido de reduzir a eficiência, devido a quebra de simetria do escoamento.

O efeito da tixotropia foi investigado experimentalmente considerando

a situação de um fluido newtoniano deslocando um fluido tixotrópico. Os testes foram realizados para duas vazões de bombeio e considerando anular concêntrico e excêntrico na posição vertical. Os resultados mostraram que o tempo de repouso do fluido na tubulação antes do início do teste e a vazão de bombeio influenciam a eficiência de deslocamento. Para esta análise, é interessante definir um parâmetro para quantificar o efeito tixotrópico como $t^* = t_f/t_{esc}$, onde t_f é definido como o tempo de re-estruturação do fluido, e t_{esc} é o tempo característico do escoamento. Os resultados qualitativos obtidos indicam que as situações de altas vazões (portanto baixos t_{esc} e altos t^*) apresentam eficiência de deslocamento inferior àquelas de baixas vazões (menores t_{esc} e portanto altos t^*). Dessa forma, os resultados obtidos indicam que a tixotropia diminui a eficiência do processo de deslocamento.

Uma última situação foi analisada, considerando o deslocamento de dois fluidos viscoplásticos. Nesse estudo foi investigado o efeito da densidade e da tensão limite de escoamento dos fluidos. Observou-se que a maior eficiência de deslocamento ocorre para a maior razão de viscosidades. A interface entre os fluidos apresenta um *finger* mais alongado do que nos casos de menor razão de viscosidades.

Os resultados obtidos no presente trabalho indicam o efeito de diferentes parâmetros no processo de deslocamento. Alguns destes parâmetros têm seus efeitos combinados e não podem ser analisados de forma independente (p.ex. número de Reynolds, razão de viscosidades e tensão limite de escoamento). Com relação a geometria, observou-se que a excentricidade e a inclinação dos dutos levam a perda de simetria e redução na eficiência do processo de deslocamento. Outro parâmetro importante, na faixa de valores usada, é a tensão interfacial, onde para altos valores do número de capilaridade ($Ca = \mu \bar{v}/\sigma$) a tensão interfacial não é importante.

Sugestões para trabalhos futuros

A análise desenvolvida no presente trabalho mostrou que muitos parâmetros afetam o processo de deslocamento de um fluido por outro. Estes parâmetros incluem aqueles que caracterizam a geometria do escoamento (como excentricidade e inclinação), os que definem a cinemática (número de Reynolds) e os que envolvem as propriedades dos fluidos (densidade e parâmetros reológicos). O presente trabalho não esgotou a análise paramétrica do problema. Assim, como sugestão para trabalhos futuros propõe-se cobrir uma maior faixa de parâmetros, utilizando simulações numéricas. O efeito da tensão interfacial não foi investigado mas pode ser importante dependendo do número de capila-

ridade do escoamento. Este efeito deveria ser investigado em trabalhos futuros.

Seria também importante a investigação do regime de escoamento turbulento na eficiência de deslocamento, principalmente ao trabalhar com fluidos newtonianos deslocando fluidos viscoplásticos, já que esta faixa de regime de escoamento pode ocorrer em situações práticas. O regime turbulento tenderia a melhorar a interface de deslocamento entre os fluidos deixando a mesma mais plana e evitando a formação de *finger*.

Finalmente, o efeito da tixotropia pode ser melhor analisado numericamente, a partir da implementação de modelos tixotrópicos e análise do efeito dos parâmetros tixotrópicos no escoamento.

Referências bibliográficas

- [1] BUCKLEY, S.; LEVERETT, M.. Mechanism of fluid displacement in sands. Society of Petroleum Engineering, 1942.
- [2] THOMAS, J. E.. Fundamentos da Engenharia do Petróleo. Interciência, Brasil, second edition, 2004. vol. 1.
- [3] SZABO, P.; HASSAGER, O.. Displacement of one newtonian fluid by another: density effects in axial annular flow: Density effects in axial annular flow. International Journal of Multiphase Flow, 1997.
- [4] FREDERICKSON, A.; BIRD, R.. Non-newtonian flow in annuli. Ind. Eng. Chem. Fund, 1958.
- [5] HANKS, R.; LARSEN, K.. The flow of power law non-newtonian fluids in concentric annuli. Ind. Eng. Chem. Fund, 1979.
- [6] HANKS, R.. The axial laminar flow of yield-pseudoplastic fluids in a concentric annulus. Ind. Eng. Chem. Process, 1979.
- [7] WALTON, I.; BITTLESTON, S.. The axial flow of a bingham plastic in a narrow eccentric annulus. Journal of Fluid Mechanics, 1991.
- [8] CLARK, C.; CARTER, L.. Mud displacement with cement slurries. Society of Petroleum Engineering, 1968.
- [9] BEIRUTE, R.; FLUMERFELT, R.. Mechanics of displacement process of drilling muds by cement slurries. Society of Petroleum Engineering, 1977.
- [10] CLEAN, R. M.; WHITAKER, W.. Displacement mechanics in primary cementing. Society of Petroleum Engineering, 1967.
- [11] TEHRANI, M.; BITTLESTON, S. ; LONG, P.. Flow instabilities during anular displacement of one non-newtonian fluid by another. Experiments in fluids, 14, 1993.

- [12] M.P. ESCUDIER, P.J. OLIVEIRA, F. P.; SMITH, S.. Fully developed laminar flow of non-newtonian liquids through annuli: comparison of numerical calculation with experiments. Experiments in fluids, 2002.
- [13] ESCUDIER, M.; OLIVEIRA, P.; PINHO, F. ; SMITH, S.. Fully developed laminar flow of nn liquids through annuli: comparison of numerical calculation with experiments. Experiments in fluids, 2002.
- [14] ALBA, K.; FRIGAARD, I.. Dynamics of removal of viscoplastic fluids from inclined pipes. J. of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2016.
- [15] HAUT, R. C.; CROOK, R. J.. Primary cementing: The mud displacement process. SPE, (8253), September 1979.
- [16] HAUT, R. C.; CROOK, R. J.. Laboratory investigation of lightweight, low-viscosity cementing spacer fluids. J. Petroleum Tech., p. 1828–1834, August 1982.
- [17] SAUER, C. W.. Mud displacement during cementing: A state of art. J. Petroleum Tech., p. 1091–1101, September 1987.
- [18] LOCKYEAR, C. F.; HIBBERT, A. P.. Integrated primary cementing study defines key factors for field success. J. Petroleum Tech., 41(12):1320–1325, December 1989.
- [19] TEHRANI, A.; FERGUSON, J. ; BITTLESTON, S. H.. Laminar displacement in annuli: A combined experimental and theoretical study. SPE, (24569), October 1992.
- [20] VEFRING, E. H.; BJORKEVOLL, K. S.; HANSEN, S. A.; STERRI, N.; SAEVAREID, O.; AAS, B. ; MERLO, A.. Optimization of displacement efficiency during primary cementing. SPE, (39009), August 1997.
- [21] FRIGAARD, I. A.; BITTLESTON, S. H. ; FERGUSON, J.. Mud removal and cement placement during primary cementing of an oil well. SPE, 2002.
- [22] FRIGAARD, I. A.; PELIPENKO, S.. Effective and ineffective strategies for mud removal and cement slurry design. SPE, (80999), 2003.
- [23] JAKOBSEN, J.; STERRI, N.; SAASEN, A.; AAS, B.; KJOSNES, I. ; VIGEN, A.. Displacement in eccentric annuli during primary cementing in deviated wells. SPE, (21686), April 1991.

- [24] GUILLOT, D.; COUTURIER, M.; HENDRIKS, H. ; CALLET, F.. **Design rules and associated spacer properties for optimal mud removal in eccentric annuli**. SPE, (21594), June 1990.
- [25] GABARD, C.; HULIN, J.. **Miscible displacements of non-newtonian fluids in a vertical tube**. The European Physical Journal, 2003.
- [26] ERGE, O.; OZBAYOGLU, E. M.; MISKA, S. Z.; YU, M.; TAKACH, N.; SAA-SEN, A. ; MAY, R.. **Laminar to turbulent transition of yield power law fluids in annuli**. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015.
- [27] DUTRA, E. S. S.; NACCACHE, M. F.; MENDES, P. R. S.; SOUTO, A. A. O.; MARTINS, A. L. ; MIRANDA, C. R.. **Analysis of interface between newtonian and non-newtonian fluids inside annular eccentric tubes**. ASME/IMECE, (59335), 2004.
- [28] SAVERY, M.; CHIN, W. ; YERUBANDI, K.. **Modeling cement placement using a new 3d flow simulator**. Proceedings of AADE Fluids Conference and Exhibition, 2008.
- [29] TARDY, P.; BITTLESTON, S.. **A model for annular displacement of wellbore completion fluids**. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015.
- [30] DEAWWANICH, T.. **Flow and Displacement of Viscoplastic Fluids in Eccentric Annuli**. PhD thesis, The University of Adelaide, 2013.
- [31] ZULQUARNAIN, M.; TYAGI, M.. **Development of simulations based correlations to predict the cement volume fraction in annular geometries after fluid displacements during primary cementing**. Journal of Petroleum Science and Engineering, 145, 2016.
- [32] BIRD, R. B.; ARMSTRONG, R. C. ; HASSAGER, O.. **Dynamics of Polymeric Liquids**. John Wiley & Sons, New York, second edition, 1987. vol. 1.
- [33] PATANKAR, S. V.. **Numerical Heat Transfer and fluid flow**. McGraw-Hill, New York, second edition, 1980. vol. 1.
- [34] MARIC, J.; HOPKEN, J. ; MOONEY, K.. **The OpenFOAM Technology Primer**. Sourceflux, Alemanha, first edition, 2014. vol. 1.

A

Procedimento de preparo dos fluidos

Durante os experimentos foram utilizados fluidos pseudoplásticos, viscoplásticos e tixotrópicos. O procedimento de preparo de cada um desses fluidos será descrito a seguir.

A.1

Preparo do Fluido Pseudoplástico

A goma Xantana é um fluido pseudoplástico muito utilizado na indústria alimentícia e de óleo e gás. O preparo deste fluido dura basicamente 1 dia. No entanto a goma xantana não tem grande durabilidade, sendo necessária a sua utilização no mesmo dia em que fica pronta.

Para a preparo do fluido os seguintes materiais são necessários:

- Balde
- 3 béckeres
- Espátula
- Balança analítica
- Misturador mecânico
- Impelidor tipo âncora

Os reagentes utilizados são:

- Goma Xantana
- Água deionizada
- Benzoato de sódio
- Sorbato de potássio

Preparo da goma xantana deve ser realizado:

1. Pesar os reagentes de acordo com a concentração (ver tabela) a ser usada;
2. Colocar o balde com água no agitador mecânico (Fisaton, modelo 723) com a pá âncora, utilizando a rotação de 300 rpm;

3. Acrescentar cuidadosamente a goma xantana pesada, para que não disperse muito (dica: jogue entre a pá e a parede do balde);
4. Agitar nessa rotação por 15 minutos;
5. Acrescentar os bactericidas pesados e agitar por 1 hora;
6. Deixar repousar de 24 horas antes dos testes.

A.2

Preparo do Fluido Viscoplástico

O Carbopol[®] é um fluido viscoplástico e seu o tempo para que o fluido esteja preparado é de cinco dias. Os materiais necessários para o preparo são:

- 1 Balde de metal
- 1 Balde de plástico
- 1 Pote baixo de vidro
- Espátula
- 1 Bécker de plástico
- Pipeta volumétrica
- Peneira de 0.85
- Balança analítica
- Misturador mecânico
- Impelidor tipo âncora
- Impelidor tipo helicoidal

Os reagentes necessários são:

- Carbopol[®]
- Água deionizada
- NaOH 18%

Procedimento:

1. Calcular as concentrações necessárias dos reagentes;
2. Anotar as quantidades fornecidas dos reagentes para começar o preparo;
3. Peneirar quantidade suficiente de Carbopol[®] para o preparo. Cuidado, o Carbopol[®] é um sólido muito fino, logo, recomenda-se o uso de máscara de proteção;

4. Pesar o Carbopol® em balança analítica;
5. Colocar o balde (de plástico para pequenas quantidades e de metal para grandes quantidades) com a água pesada no agitador mecânico com a pá helicoidal (vertical para pequenas quantidades, e inclinada para grandes quantidades), utilizando uma rotação próxima de 1100 - 1200 rpm;
6. Acrescentar cuidadosamente o Carbopol®: de preferência, pesar em um recipiente baixo de vidro, e ao despejar lentamente, deixar que o sólido caia pela lateral do pote, com cuidado para que não fique sólido na pá;
7. Agitar nessa rotação por 15 minutos;
8. Desligar o agitador por 30 minutos;
9. Trocar a pá helicoidal pela pá âncora;
10. Pesar o NaOH em balança analítica e em bécker de plástico;
11. Ligar o misturador, utilizando a rotação de 300 rpm, e acrescentar o NaOH bem devagar, pela lateral do balde;
12. Deixar agitando por 5 dias.
13. Caso seja preparada um grande quantidade de Carbopol®, mais de 5 kg, logo após os 5 dias há a necessidade de misturar, com a pá helicoidal, por mais uma hora, para a retirada das bolhas.

A.3

Preparo do Fluido Tixotrópico

Para o preparo da Laponita® são necessários o preparo de solução de NaOH e NaCl antes. Vale ressaltar que o durante o preparo, o PH da Laponita® deve ser controlado não ultrapassando o valor de 10. Primeiramente serão descritos os procedimentos de preparo das soluções de NaOH e NaCl. O preparo descrito corresponde a solução de Laponita® 2%.

Os materiais necessários para o preparo da solução são:

- Balde
- 2 Pipetas Volumétrica de 10,00mL
- Bastão de vidro
- Proveta de 100mL
- Bécker de 50mL
- Balança Analítica

- Misturador Mecânico
- Impelidor tipo Helicoidal

Os reagentes que serão usados:

- Laponita[®]
- Água Deionizada
- Cloreto de Sódio 0,4M
- Hidróxido de Sódio 0,04M

Procedimentos:

1. Pesar os reagentes de acordo com a concentração apresentada na tabela;
2. Acrescentar ao balde com água deionizada 10,23mL de NaOH e homogeneizar. Para isso, use duas pipetas: uma volumétrica de 10,00mL e uma graduada de 1,0mL;
3. Depois de homogeneizado com bastão de vidro, retirar, com auxílio de uma proveta, 100mL dessa solução e descartar;
4. Colocar o balde com a solução preparada no agitador mecânico, com a pá helicoidal, utilizando a rotação de aproximadamente 500 rpm, para acrescentar a Laponita[®]. Observação importante: é preciso que o aparato para a pá esteja levantado;
5. Acrescentar cuidadosamente a Laponita[®] pesada, para que não disperse muito (dica: jogue entre a pá e a parede do balde), e aumentar a rotação para 1600 rpm;
6. Agitar nessa rotação por 30 minutos;
7. Acrescentar 10,0mL de NaCl e agitar por mais 30 minutos;
8. Deixar repousar por 8 dias antes dos testes.

Concentração 2%	
Laponita [®]	80 g
Água deionizada	4000 g
NaOH	10.00 mL
NaCl	10.00 mL