4 Resultados

4.1 Validação da bancada experimental

Foi realizada uma sequência de testes afim de validar a bancada experimental. A verificação foi realizada através do deslocamento de um fluido newtoniano por outro newtoniano de modo que os resultados pudessem ser comparados com os da literatura. Os fluidos utilizados foram óleo mineral e soluções aquosas de glicerina nas concentrações de 86%, 80% e 77%.

As características dos fluidos utilizados são apresentadas na Tabela 4.1, sendo ρ , a densidade, μ , a viscosidade newtoniana e, σ , a tensão superficial.

Tabela 4.1: Características dos fluidos utilizados para validação da bancada experimental

Fluido	$\rho [\mathrm{Kg/m^3}]$	μ [Pa.s]	$\sigma [{\rm mN/m}]$
Óleo mineral	867, 60	0,134	28,40
Glicerina 86%	1218,40	0,080	64, 80
Glicerina 80%	1191,10	0,025	62, 50
Glicerina 77%	1194, 1	0,028	61,70

A lei de Antonoff (10, 20) afirma que a diferença entre a tensão superficial dos dois líquidos é uma boa aproximação da tensão interfacial. A média calculada para o valor de tesão interfacial entre o óleo e as diferentes concentrações de glicerina é de 34,60 [mN/m] e o desvio padrão é de 1,61 [mN/m].

Os resultados obtidos para os testes envolvendo o deslocamento do óleo pela glicerina, e vice-versa, são apresentados nas Fig. 4.1-4.5. A razão de viscosidade é representada por μ^* conforme a equação 4-1.

$$\mu^* = \frac{\mu_{deslocado}}{\mu_{deslocador}} \tag{4-1}$$



Figura 4.1: Padrão de formação do escoamento para $\mu^*=4,750$ – Glicerina 77% deslocando óleo mineral a 25°C e 336,52g/min



Figura 4.2: Padrão de formação do escoamento para $\mu^*=5,332$ – Glicerina 80% deslocando óleo mineral a 25°C e 455,83g/min



Figura 4.3: Padrão de formação do escoamento para $\mu^*=1,687$ – Glicerina 86% deslocando óleo mineral a 25°C e 396,69g/min

Figura 4.4: Padrão de formação do escoamento para $\mu^* = 0,211 -$ Óleo mineral deslocando glicerina 77% a 25°C e 40,90g/min



Figura 4.5: Padrão de formação do escoamento para $\mu^* = 0, 188 -$ Óleo mineral deslocando glicerina 80% a 25°C e 40,90g/min

A partir da análise dos resultados, pode-se observar que as Figs. 4.1, 4.2 e 4.3 representam casos em que há ocorrência de *viscous fingering* e as Figs. 4.4 e 4.5 representam os casos com formação de plugs.

Nos casos em que foram observados plugs, não houve a formação de uma interface plana em função do efeito dos furos utilizados para o preenchimento inicial da célula. Esse efeito pode ser compreendido através da análise da Fig. 4.6. Entretanto, mesmo sem haver uma interface plana, pode-se concluir que esse padrão de escoamento representa um caso de formação de plug, pois a eficiência de deslocamento é igual a 100% e não há uma variação no perfil de deslocamento após um determinado instante de tempo. Ou seja, ocorreu uma estabilização do perfil da interface caracterizando a ocorrência de um plug.



Figura 4.6: Identificação do efeito de entrada

4.2 Caracterização reológica

Conforme explicitado anteriormente no capítulo 2, os fluidos utilizados nos testes de visualização foram a goma xantana 0,86% (anexo B) e um determinado óleo mineral.

4.2.1 Goma xantana

Grande parte dos fluidos estruturados apresentam forte efeito viscoelástico a baixas deformações e sua medição é fundamental para compreender a microestrutura do material. Entretanto, se a tensão e deformação forem relativamente grandes, há efeitos de tixotropia na natureza do material. A diferença entre esses dois efeitos é justificada por mudanças na região viscoelástica linear (6). Se há predominância de viscoelasticidade a microestrutura responde durante uma determinada escala de tempo sem alterações. Caso a tixotropia seja dominante ocorre mudança na microestrutura, através de sua construção e desconstrução, e essa mudança demora um certo tempo.

A Figura 4.7 apresenta os testes oscilatórios realizados para investigar a região viscoelástica linear. Pode-se observar que na maior parte da faixa de frequência analisada, há predominância do módulo elástico.

60



Figura 4.7: Testes oscilatórios: strain sweep e frequency sweep

O teste denominado *step change* pode ser empregado para distinguir os efeitos de elasticidade e tixotropia. Esse teste consiste em inicialmente aplicar uma taxa de deformação constante e elevada e, em t = 0s esse valor é reduzido e a resposta de tensão de cisalhamento deve ser analisada. Inicialmente há a quebra da microestrutura e tensão diminui com o tempo até alcançar o equilíbrio. Em t = 0s, há a reconstrução da microestrutura em função do tempo. A representação esquemática é apresentada na Fig 4.8. Caso ocorresse uma gradual redução do valor de tensão após t = 0s, haveria uma indicação da predominância dos efeitos elásticos.



Figura 4.8: Teste Step change

As Figuras 4.9 - 4.11 representam os testes realizados para estudar a diferença entre tixotropia e viscoelasticidade. As Figuras 4.12, 4.13 e 4.14 apresentam as curvas da evolução da viscosidade com o tempo com taxas de deformação constantes em $0, 01, 0, 1 \in 11/s$, respectivamente. Pode-se observar que a goma xantana é um fluido com características dependentes do tempo, ou seja, possui características tixotrópicas (48).



Figura 4.9: Análise de tixotropia para $\dot{\gamma} = 0.01 \text{ 1/s}$



Figura 4.10: Análise de tixotropia para $\dot{\gamma}=0.1$ 1/s



Figura 4.11: Análise de tixotropia para $\dot{\gamma}=1$ 1/s



Figura 4.12: Determinação do regime permanente para $\dot{\gamma}=0.01$ 1/s



Figura 4.13: Determinação do regime permanente para $\dot{\gamma} = 0.1 \text{ 1/s}$



Figura 4.14: Determinação do regime permanente para $\dot{\gamma} = 1$ 1/s

A função de viscosidade da goma xantana foi obtida no reômetro rotacional AR-G2, da marca TA Instruments, através do uso da geometria placas paralelas ranhuradas (*cross hatched*) com 50 mm de diâmetro. Essa geometria foi selecionada para minimizar os efeitos de deslizamento aparente, os quais comprometem a caracterização reológica (4).

A partir dos testes tixotrópicos, foi definido um tempo de leitura cada ponto da curva de escoamento para que o regime permanente fosse atingido. Para cada valor de taxa de deformação, foi realizada uma leitura de pontos durante 30 segundos e esse valor foi armazenado. Após 3 pontos consecutivos com tolerância menor ou igual a 0, 1%, assume-se que houve convergência e um ponto do gráfico é plotado. O tempo máximo para obtenção de cada ponto do gráfico foi estabelecido em 700 segundos. Assim, as leituras foram feitas entre 90 e 700 segundos. Para obter as curvas de escoamento que representassem o comportamento da goma xantana, foram feitos testes a 20 e 25°C, as mesmas dos experimentos de visualização. Observou-se que a goma xantana não é sensível à temperatura, pois as curvas de escoamento obtidas foram iguais entre si. Na Figura 4.15 pode-se observar um comportamento pseudoplástico, visto que a viscosidade diminui com a taxa de deformação e não foi observada uma tensão limite de escoamento. A função de viscosidade *power-law* (eq. 3-11) foi empregada para fazer um ajuste da curva de tensão e obter os parâmetros reológicos.



Figura 4.15: Reologia da Goma Xantana 0.86%

A Tabela 4.2 apresenta os valores do índice de comportamento, n, e do índice de consistência, k. Outras caracterizações importantes da goma xantana 0.86% foram obtidas no Laboratório de Caracterização de Fluidos (LCF) da PUC-Rio, como tensão superficial, σ_{GX} , e densidade, ρ_{GX} , conforme a Tab. 4.2. Esses parâmetros também não variaram com a temperatura.

Parâmetro	Valor
$k [Pa.s^n]$	13,894
n []	0,09673
$\sigma_{GX} \text{ [mN/m] a 25°C}$	86, 0
$ ho_{GX} [\mathrm{Kg/m^3}] \mathrm{\ a\ 25^\circ C}$	984, 6
$\sigma_{GX} \text{ [mN/m] a 20°C}$	92,4
$ ho_{GX} [\mathrm{Kg/m^3}] \mathrm{a} 20^{\circ}\mathrm{C}$	971, 9

Tabela 4.2: Características da Goma Xantana

4.2.2 Óleo mineral

A viscosidade newtoniana do óleo mineral foi obtida através de um viscosímetro e de um reômetro rotacional para confirmar os resultados. No reômetro Paar Physica MCR 301, a viscosidade foi determinada com a geometria *Double Couette* e os resultados obtidos são apresentadas na Fig. 4.16. Cada teste no reômetro foi repetido pelo menos duas vezes para verificar a repetibilidade dos resultados. O resultado obtido no LCF através do viscosímetro Cannon-Fenske apresentou concordância com os resultados obtidos com o reômetro. No LCF, também foi determinada a tensão superficial e a densidade do óleo, respectivamente σ_{oleo} e ρ_{oleo} como pode ser visto na Tab. 4.3.

Óleos newtonianos geralmente possuem viscosidade muito sensível a variações de temperatura e por isso um controle preciso deve ser feito. A Figura 4.17 apresenta um gráfico da viscosidade do óleo mineral em função da temperatura. Pode-se observar que a viscosidade varia 22% entre 20 e 24°C.

Parâmetro	Valor
μ [Pa.s] a 25°C	0,131
$\sigma_{oleo} \; [mN/m] \; a \; 25^{\circ}C$	29, 2
$\rho_{oleo} \; [\mathrm{Kg/m^3}] \; \mathrm{a} \; 25^{\circ}\mathrm{C}$	865, 5
μ [Pa.s] a 20°C	0,182
$\sigma_{oleo} \; [mN/m] \; a \; 20^{\circ}C$	28, 4
$\rho_{oleo} [\mathrm{Kg/m^3}] \mathrm{a} 20^{\circ}\mathrm{C}$	867,6

Tabela 4.3: Características do óleo mineral



Figura 4.16: Reologia do óleo mineral



Figura 4.17: Rampa de temperatura do óleo mineral

4.3 Adimensionalização

Os parâmetros adimensionais foram calculados para cada par de fluidos analisado com base nas equações definidas no capítulo 3. Assim, um par de fluidos é representado pela goma xantana 0,86% e pelo óleo mineral a 25°C e o outro pela goma xantana 0,86% e pelo óleo mineral a 20°C.

A taxa de deformação característica (eq. 3-19) e a viscosidade característica (eq. 3-22) apresentam um valor fixo para cada par de fluidos analisado e são empregadas no cálculo de \bar{u}^* , η^* e *Ca*.

Para avaliar o número de capilaridade reológico (eq. 3-27), uma estimativa do valor da tensão interfacial, σ , entre o óleo mineral e a goma xantana 0.86% foi feita baseado na lei de Antonoff (10, 20). Assim, $\sigma_{25C} = 56,8 \text{ mN/m}$ e $\sigma_{20C} = 64,0 \text{ mN/m}$ para 25°C e 20°C, respectivamente.

A Tabela 4.4 apresenta os valores obtidos para o caso dos testes realizados a 25 e 20°C.

Parâmetro	Valor
$\dot{\gamma}_c \ [1/s] \ a \ 25^{\circ}C$	174,773
$\eta_c \; [\text{Pa.s}]$ a 25°C	0,131
<i>Ca</i> [] a 25°C	0,282
$\dot{\gamma}_c \ [1/s]$ a 20°C	121,466
η_c [Pa.s] a 20°C	0,182
<i>Ca</i> [] a 20°C	0,242

Tabela 4.4: Parâmetros característicos e adimensionais constantes

A taxa de deformação adimensional, $\bar{u}^* \equiv \dot{\gamma}^*$, e a razão de viscosidade adimensional, η^* , dependem da taxa de deformação, ou seja, da vazão do escoamento. Assim, a Figura 4.18 apresenta um único gráfico de η^* em função de $\dot{\gamma}^*$ para os dois pares de fluidos estudados. Assim, foram determinados os casos em que há formação de *fingers* e os casos em que há um deslocamento do tipo *plug*, conforme a Fig. 3.14.

A eficiência da adimensionalização proposta fica clara na Fig.4.18, pois o mesmo gráfico permite a análise de todos os conjuntos de fluidos com as mesmas características de Ca e de n do fluido pseudoplástico.



Figura 4.18: Adimensionalização proposta

Para avaliar a influência do número de capilaridade reológico três variáveis podem ser alteradas: folga, velocidade do escoamento ou o par de fluidos. A construção da célula utilizada neste trabalho inviabiliza a alteração da folga e as bombas disponíveis limitam a variação da vazão. Optou-se pela variação dos pares de fluidos para observar esta influência, entretanto não foi possível realizar testes com uma variação significativa da ordem de grandeza de Ca. Como pode ser observado na Tab. 4.4, o valor do Ca é muito pequeno o que torna desprezível a influência da inércia no escoamento.

4.4 Experimentos de visualização

A Figura 4.19 apresenta os casos estudados neste trabalho e a Fig. 4.20 apresenta a faixa de número de Reynolds, Re, investigada em função da velocidade adimensional. Esse parâmetro é calculado de acordo com a eq. 4-2, onde ρ_{oleo} é a densidade do óleo mineral, \bar{u} é a velocidade média do óleo, b é a folga entre as placas paralelas e μ é a viscosidade do óleo. Pode-se observar que Re é sempre menor do que 1, assim os efeitos de inércia podem ser desprezados, conforme (16).

$$Re = \frac{\rho_{oleo}\bar{u}b}{\mu} \tag{4-2}$$



Figura 4.19: Adimensionalização dos casos investigados neste trabalho



Figura 4.20: Número de Reynolds em função da velocidade adimensional

Capítulo 4. Resultados

As Figuras 4.21 - 4.63 apresentam as imagens tratadas do escoamento entre a goma xantana e o óleo mineral a 25 e 20°C. As Figuras são apresentadas em ordem crescente da velocidade adimensional. Observe que bolhas na goma xantana são representadas por pixels brancos isolados.



Figura 4.21: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 0,050 \ (\eta^* = 15,094)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°C e 0,986g/min



Figura 4.22: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 0,416 \ (\eta^* = 2,208)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°C e 8,279g/min



Figura 4.23: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 0,780 \ (\eta^* = 1,252)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°C e 15,518g/min



Figura 4.24: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 1,133$ ($\eta^* = 0,893$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°C e 22,549g/min



Figura 4.25: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 1,469 \ (\eta^* = 0,706)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°C e 22,236g/min



Figura 4.26: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 1,588 \ (\eta^* = 0,659)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°C e 31,590g/min



Figura 4.27: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 1,783$ ($\eta^* = 0,593$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°C e 35,469g/min



Figura 4.28: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 2,069 \ (\eta^* = 0,519)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°C e 41,161g/min



Figura 4.29: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 2,266 \ (\eta^* = 0,478)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 20°C e 31,405g/min



Figura 4.30: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 2,324 \ (\eta^* = 0,467)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°C e 46,247g/min



Figura 4.31: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 2,547 \ (\eta^* = 0,430)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°C e 50,686g/min



Figura 4.32: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 2,737 \ (\eta^* = 0,403)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°C e 54,457g/min



Figura 4.33: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 3,017 \ (\eta^* = 0,369)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°C e 60,039g/min



Figura 4.34: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 3,181 \ (\eta^* = 0,352)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°C e 63,302g/min



Figura 4.35: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 3,263 \ (\eta^* = 0,344)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°C e 64,922g/min



Figura 4.36: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 3,314 \ (\eta^* = 0,339)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°C e 65,941g/min



Figura 4.37: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 3,389 \ (\eta^* = 0,332)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°C e 67,426g/min



Figura 4.38: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 3,406 \ (\eta^* = 0,331)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°C e 67,769g/min



Figura 4.39: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 4,703 \ (\eta^* = 0,247)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 20°C e 65,188g/min



Figura 4.40: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 5,083 \ (\eta^* = 0,230)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°C e 101,135g/min



Figura 4.41: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 6,670 \ (\eta^* = 0,180)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°C e 132,717g/min



Figura 4.42: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 6,944 \ (\eta^* = 0,174)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 20°C e 96,239g/min



Figura 4.43: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 8,151 \ (\eta^* = 0,150)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°C e 132,717g/min



Figura 4.44: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 8,987 \ (\eta^* = 0,138)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 20°C e 124,559g/min



Figura 4.45: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 9,524 \ (\eta^* = 0,131)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°C e 189,503g/min



Figura 4.46: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 10,791 \ (\eta^* = 0,117)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°C e 214,705g/min



Figura 4.47: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 10,833 \ (\eta^* = 0,116)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 20°C e 150,145g/min



Figura 4.48: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 11,951 \ (\eta^* = 0,106)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°C e 237,781g/min



Figura 4.49: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 12,482 \ (\eta^* = 0,102)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 20°C e 173,000g/min



Figura 4.50: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 13,003 \ (\eta^* = 0,099)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°C e 258,731g/min



Figura 4.51: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 13,934 \ (\eta^* = 0,093)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 20°C e 193,123g/min



Figura 4.52: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 13,949 \ (\eta^* = 0,093)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°C e 277,553g/min







Figura 4.54: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 15, 189 \ (\eta^* = 0, 086)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 20°C e 210, 513g/min



Figura 4.55: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 16, 146 \ (\eta^* = 0, 081)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°C e 321, 261g/min



Figura 4.56: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 16,247 \ (\eta^* = 0,081)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 20°C e 225,171g/min



Figura 4.57: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 17,076 \ (\eta^* = 0,077)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°C e 339,767g/min



Figura 4.58: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 17,107 (\eta^* = 0,077)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 20°C e 237,097g/min



Figura 4.59: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 17,579 \ (\eta^* = 0,075)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°C e 349,766g/min



Figura 4.60: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^*=17,654~(\eta^*=0,075)$ Goma xantana0.86% deslocada por óleo mineral a 25°C e 351,258g/min



Figura 4.61: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 17,770 \ (\eta^* = 0,074)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 20°C e 246,291g/min



Figura 4.62: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 18,506 \ (\eta^* = 0,072)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 20°C e 256,481g/min



Figura 4.63: Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 42,094 \ (\eta^* = 0,034)$ Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 20°C e 583,400g/min

A partir da análise das fotos do escoamento, pode-se observar que a largura dos *fingers* aumenta com a velocidade adimensional. A Figura 4.64 apresenta a eficiência de deslocamento em função velocidade adimensional. Assim, observa-se que conforme a largura dos *fingers* aumenta, há uma tendência de incremento da eficiência com a velocidade adimensional. Podese observar que há propagação de apenas um *finger* na célula em função do efeito do formato do orifício de entrada da célula. O fluido é injetado em uma cavidade circular, conforme a Fig. 2.4.



Figura 4.64: Eficiência de deslocamento em função da velocidade adimensional

As Figuras 4.21 - 4.47 ilustram os casos em que há ocorrência de fingers e as Figs. 4.48 - 4.63 ilustram os casos em que **não** há ocorrência de fingers. Neste trabalho, esses casos são denominados *plugs*. Note que as Figs. 4.41 -4.47 apresentam a transição entre a mudança de padrão de fingers para *plugs* e que podemos afirmar que a partir de \bar{u}^* acima de 10,833 há a formação de uma interface estável caracterizando a ocorrência de *plugs*.

O padrão de formação do escoamento do tipo *plug* não apresenta o comportamento tradicionalmente esperado, com uma interface plana e com deslocamento do tipo pistão. Pretendia-se obter uma interface plana para velocidades adimensionais acima de 1 e consequentemente haveria uma eficiência de deslocamento tendendo a 100%. Entretanto, observa-se a formação de um padrão triangular simétrico. A Figura 4.65 ilustra os diferentes padrões do escoamento. Observe que a transição de *finger* para *plug* não ocorre em 1, mas em uma faixa entre 6,670 e 10,833.



Figura 4.65: Identificação dos padrões de escoamento

A Figura 4.66 exemplifica a variação do ângulo formado pelos dois lados da interface com a velocidade adimensional para as temperaturas investigadas. Para os valores de \bar{u}^* acima de 10,833, há uma tendência linear de incremento do ângulo com a velocidade adimensional. Valores de \bar{u}^* abaixo de 10,833, os quais são considerados *fingers*, não fazem parte dessa linearidade pois não apresentam o comportamento com formato triangular. A importância deste gráfico é justificada simplesmente pelo fato de que a variação de ângulo representa a manifestação de um efeito indesejado que é o padrão triangular do deslocamento.

Foi feita uma análise do ângulo formado pelos dois lados da interface. Essa análise foi possível em função do padrão simétrico observado na faixa em que há ocorrência de *plugs*. A Figura 4.67 exemplifica um dos casos investigados. Podese constatar que ao final do escoamento, a geometria formada aproxima-se de um triângulo, e por isso prolonga-se as duas linhas de tendência da interface, em vermelho, até que se cruzem na frente do escoamento. Esse ângulo formado pode ser sobreposto aos diferentes instantes do escoamento. A despeito da frente do escoamento, que torna-se mais pontiaguda ao longo do tempo, a base desloca-se como bloco único de deslocamento, característica básica dos *plugs*.



Figura 4.66: Variação do ângulo do padrão de escoamento em função da velocidade adimensional



Figura 4.67: Variação do ângulo do padrão de escoamento em função do tempo de escoamento para $\bar{u}^*=13,949$

Capítulo 4. Resultados

Algumas hipóteses foram investigadas para explicar o porquê do padrão de deslocamento não estar pistonado. Não há nenhuma razão física para que a célula de Hele-Shaw não esteja com suas placas paralelas. Entretanto, como a folga é muito pequena, qualquer variação pode ser considerada importante.

Após a comparação da validação da bancada com os resultados obtidos, acredita-se que a razão para esse comportamento seja explicada pela influência dos furos de preenchimento da célula, conforme explicado na seção 4.1.