

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO.  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Ivanor Martins da Silva

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO.

Análise Experimental do Deslocamento de Líquidos em Meios Porosos  
Artificiais por Injeção de Gás: Efeito da Capilaridade, Inércia e Diâmetro Médio  
dos Grãos.

Vitória, 2012.

Ivanor Martins da Silva

Análise Experimental do Deslocamento de Líquidos em Meios Porosos  
Artificiais por Injeção de Gás: Efeito da Capilaridade, Inércia e Diâmetro Médio  
dos Grãos.

Dissertação apresentada ao Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica da Universidade Federal do Espírito  
Santo como requisito parcial  
para a obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Mecânica.  
Orientador: Prof. Dr. Edson José Soares  
Co-orientador: Prof. Dr. Márcio Ferreira Martins.

Vitória, 2012.

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

Silva, Ivanor Martins da, 1970-  
S586a Análise experimental do deslocamento de líquidos em meios  
porosos artificiais por injeção de gás : efeito da capilaridade,  
inércia e diâmetro médio dos grãos / Ivanor Martins da Silva. –  
2012.  
84 f. : il.

Orientador: Edson José Soares.  
Coorientador: Márcio Ferreira Martins.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –  
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Capilaridade. 2. Reservatórios. 3. Tensão superficial. I.  
Soares, Edson José. II. Martins, Márcio Ferreira. III. Universidade  
Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621

---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Análise Experimental do Deslocamento de Líquidos em Meios Porosos  
Artificiais por Injeção de Gás: Efeito da Capilaridade, Inércia e Diâmetro  
Médio dos Grãos.**

Ivanor Martins da Silva

COMISSÃO EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Edson José Soares - Orientador  
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

---

Prof. Dr. Márcio Ferreira Martins – Coorientador  
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

---

Prof. Dr. Rogério Ramos - Membro Interno  
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

---

Prof. Dr. Renato do Nascimento Siqueira -Membro Externo  
Instituto Federal do Espírito Santo - IFES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Vitória (ES), 28 de setembro de 2012.

*“Bem-aventurado o homem que acha sabedoria, e adquire conhecimento.  
Porque melhor é o seu valor do que a prata, e a sua renda do que o ouro mais fino”.*  
Salomão (Pv 3.13-14).

Dedico á minha família, pela força que me deram e a paciência que tiveram comigo.

# Agradecimentos

Agradeço a Deus porque acredito que Ele me sustenta e me fortalece a cada dia, e por mais essa tão grande conquista.

À toda a minha família, pela motivação, paciência e amor que me ajudaram a vencer esta difícil etapa.

Ao Prof. Edson José Soares, que acreditou em mim e me proporcionou essa chance de fazer o mestrado, que sem ele, não seria possível. E também pela excelente orientação, e por muito que aprendi com ele, que levarei para o resto da vida, e além de meu professor, o considero como um grande amigo.

Ao Prof. Márcio Ferreira Martins, pela orientação, montagem da bancada no laboratório e o auxílio e atenção em todo o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Rogério Ramos, que muito me ajudou em todo o mestrado e também me proporcionou chances que eu não merecia. Pelo muito tempo que me orientou no início do mestrado, pela paciência e pelo apoio. Pelo apoio de verba de seus projetos para montagem do laboratório.

Aos Prof. Carlos Friederich Loeffler, Prof. José Joaquim da Conceição Soares Santos, Prof. João Luiz Calmon Donatelli e Prof. Antônio Bento Filho, que sempre me motivaram e pelo apoio que me deram.

Ao Prof. Aloir Fassarella, pelo o apoio com o Laboratório de Metrologia. Aos Prof. Chélio Scandian e Prof. Marcelo Camargo, pelo apoio com o Laboratório de Tribologia.. Ao Prof. Rogério Silveira de Queiroz, pelo o apoio com materiais e instrumentos.

Ao Prof. Renato do Nascimento Siqueira, do IFES, pela ajuda e motivação.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo.

À ANP, pela bolsa de pesquisador visitante. À todos os funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica.

Aos grandes amigos Moisés Silva e André Luiz Perazzo Amaral, pela motivação e apoio. Ao aluno Jaderson Pretti, pela ajuda com os trabalhos no laboratório.



# Sumário

<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Tabelas .....</b>	<b>xii</b>
<b>Resumo.....</b>	<b>xiii</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>14</b>
<b>Lista de Símbolos. ....</b>	<b>15</b>
<b>Introdução .....</b>	<b>16</b>
1.1 Motivação .....	16
1.2 Estado da Arte .....	18
1.3 Caracterização do Problema .....	26
<b>Abordagem Experimental .....</b>	<b>28</b>
2.1 Separação das esferas de vidro .....	34
2.2 Determinação dos Diâmetros das Esferas e Distribuição em Frequência .....	37
2.3 Caracterização dos Fluidos de Teste.....	41
2.4 Determinação da Porosidade .....	49
2.5 Determinação da Vazão de Líquido e da Massa Perdida .....	50
2.6 Determinação da Velocidade Média da Massa Recuperada, da Velocidade da Interface Gás-Líquido e do Número de Capilaridade.....	51
2.7 Informações Experimentais Complementares .....	55
<b>Resultados .....</b>	<b>60</b>

3.1 Efeitos do Número de Capilaridade e do Tamanho Médio dos Grãos .....	61
3.2 Efeitos de Inércia .....	64
3.3 Efeitos de Parâmetros Dimensionais (Tensão Superficial) .....	68
<b>Comentários Finais.....</b>	<b>73</b>
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>76</b>
<b>ANEXO .....</b>	<b>79</b>
<b>Anexo A. Resultados dos Experimentos na Forma de Tabela. ....</b>	<b>80</b>

# Lista de Figuras

2.1: Desenho esquemático do sistema montado para os experimentos.....	29
2.2: Sistema utilizado para realização dos experimentos. ....	31
2.3: Detalhes e dimensões dos componentes do sistema. ....	33
2.4: Freqüência de distribuição dos diâmetros das esferas da faixa 0,50 a 0,85 mm.....	38
2.5: Freqüência de distribuição dos diâmetros das esferas da faixa 1,00 a 1,18 mm.....	39
2.6: Freqüência de distribuição dos diâmetros das esferas da faixa 1,4 a 1,8 mm.....	40
2.7: Freqüência de distribuição dos diâmetros das esferas da faixa 1,80 a 2,0 mm.....	41
2.8: Viscosidade cinemática em função da concentração de PEG, medido a 25°C. ....	44
2.9: Viscosidade cinemática em função da temperatura.....	45
2.10: (a) Fluxo em um canal capilar no meio poroso. (b) Gás empurrando líquido em um tubo capilar. ....	54
2.11: Esquema idealizado mostrando como as forças capilares agem quando um fluido desloca outro em um meio poroso, e como o fluido deslocado fica aprisionado. Adaptado de Herbeck et al [12]. ....	55
2.12. Líquido viscoso retido no meio poroso após a passagem de um gás.....	55
3.1: Efeito do número de capilaridade e do tamanho médio do grão na fração de massa perdida. Fluido mais viscoso ( $\nu = 200$ cSt e $\sigma = 52$ mN/m). Variando o meio poroso: $\bar{d} = 0,73$ mm e $\bar{d} = 1,91$ mm. ....	62

3.2: Efeitos de inércia. (a) Meio poroso com $\bar{d} = 0,73$ mm). (b) Meio poroso com $\bar{d} = 1,65$ mm). (c) Meio poroso com $\bar{d} = 1,91$ mm). Variando o Fluido. Comparação com Xavier [7].....	66
3.3: Efeito da tensão superficial e do tamanho médio do grão. Fluido com tensoativo ( $\nu = 40$ cSt e $\sigma = 28$ mN/m). Variando o meio poroso: $\bar{d} = 0,73$ mm, $\bar{d} = 1,14$ mm e $\bar{d} = 1,91$ mm.....	69
3.4: Resumo de todos os efeitos ( $Ca$ , tamanho do grão, inércia e tensão superficial) em escala logarítmica, com melhor visualização da região de baixa capilaridade. ....	71

# Lista de Tabelas

2.1: Meios porosos utilizados nos experimentos. ....	34
2.2: Volume de esferas filtrado em função do volume colocado.....	35
2.3: Volume de esferas filtrado em função do tempo de peneiramento.....	36
2.4. Propriedades dos fluidos utilizados nos experimentos. ....	42
2.5. Relação entre a concentração de PEG e a viscosidade cinemática.....	43
2.6. Propriedades dos fluidos a 25°C. ....	46

# Resumo

O deslocamento de um líquido em meios porosos por injeção de outro fluido é muito aplicado em processos industriais, como recuperação de óleo em um reservatório petrolífero, limpeza de solos contaminados e seqüestro geológico de carbono (CO<sub>2</sub>). Atualmente a quantidade de óleo que se consegue retirar de uma jazida varia de valores inferiores a 20% até valores superiores a 60% do volume original da jazida (veja [23] e [24]), devido à complexidade do processo. Com o contínuo aumento do preço do barril no mercado nas últimas décadas, há uma preocupação da humanidade tanto de se encontrar novas reservas como de aumentar o fator de recuperação daquelas já existentes.

O presente trabalho avalia experimentalmente a fração de massa perdida, ou massa que fica retida em um meio poroso artificial constituído de esferas de vidro, quando o ar é injetado no sistema para empurrar um líquido viscoso. Três soluções contendo polietileno glicol (PEG) são usadas como fluido deslocado: uma solução água-PEG mais concentrada (fluido mais viscoso), uma solução água-PEG menos concentrada (fluido menos viscoso) e uma solução de água-PEG e álcool etílico (fluido com baixa tensão superficial). Investiga-se a influência do número de capilaridade  $Ca = U\mu / \sigma$ , que é a razão entre as forças viscosas e as forças devidas à tensão superficial, e do diâmetro médio das esferas que compõem o leito. Os resultados são comparados com a literatura. Os experimentos são feitos com quatro meios porosos diferentes, com diâmetros médios de 0,73 mm, 1,14 mm, 1,65 mm e 1,91 mm. Conclui-se que a fração de massa perdida não é função só de parâmetros adimensionais como  $Ca$ , mas também de grandezas dimensionais, como a tensão superficial, diferentemente do processo em tubo capilar. De forma geral, a fração de massa perdida  $m$  aumenta com o aumento de  $Ca$  e com a diminuição do diâmetro médio das esferas.

# Abstract

The displacement of a liquid in porous media by injecting another fluid is very applied in industrial processes such as oil recovery in a petroleum reservoir, cleaning of contaminated soils and geological sequestration of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). Currently the amount of oil that can be drawn from a reservoir varies between values below 20% to greater than 60% of the original volume of the reservoir (according [23] and [24]), due to the complexity of the process. With the continuous increase in oil prices in the market in recent decades, there is concern of humanity both to find new reserves and to increase the recovery factor of the existing ones. This presented work experimentally evaluates the fraction of lost mass or mass that is retained on an artificial porous medium consisting of artificial glass beads, when air is injected into the system to push a viscous liquid. Three solutions containing polyethylene glycol (PEG) are used as fluid displaced: a more concentrated PEG-water solution (more viscous fluid), a less concentrated PEG-water solution (less viscous fluid) and a solution of water and ethanol-PEG (fluid with low surface tension). We have investigated the influence of capillary number, which is the ratio between the viscous forces and the forces due to surface tension, and the diameter of the balls that make up the bed. The results are compared with the literature. Experiments are performed with four different porous media with an average diameter of 0.73 mm, 1.14 mm, 1.65 mm and 1.91 mm. It was concluded that the fraction of mass lost is not only function of dimensionless parameters such as  $Ca$ , but also dimensional quantities, such as surface tension, unlike the case in the capillary tube. Generally, the fraction of lost mass  $m$  increases with increasing  $Ca$  and with decreasing diameter of the spheres.

# Lista de Símbolos.

A: área de seção reta do tubo.

Ca: Número de capilaridade  $Ca = \frac{U\mu}{\sigma}$ .

$\bar{d}$ : Diâmetro médio das esferas do meio poroso.

D: Diâmetro interno do tubo de acrílico do meio poroso.

m: Fração de massa perdida.

$\dot{m}$ : Vazão mássica do líquido no meio poroso.

PEG: Polietileno glicol.

$\bar{u}$ : Velocidade média do líquido recuperado no meio poroso.

U: Velocidade média da interface gás-líquido no meio poroso.

t: Tempo de medição do experimento.

## SÍMBOLOS GREGOS:

$\mu$ : viscosidade dinâmica.

$\nu$ : viscosidade cinemática.

$\rho$ : massa específica.

$\phi$ : porosidade do leito.

$\sigma$ : tensão superficial.



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

O deslocamento de um líquido por um gás (ou outro líquido) em um meio poroso é usual em algumas aplicações práticas, entre elas na recuperação de petróleo em rochas porosas, na limpeza de solos contaminados e no seqüestro geológico de carbono.

A principal aplicação que motiva este estudo é a recuperação de fluido em um reservatório de petróleo. Com o aumento do consumo de combustíveis fósseis torna-se cada vez mais importante o estudo de métodos que possam aumentar a quantidade de óleo retirada de uma jazida. O fator de recuperação em um reservatório de petróleo pode ser menor que 20% quando não se usa nenhum método de recuperação (injeção de algum produto); pode atingir 50% com métodos tradicionais, como injeção de água ou de gás, e ultrapassar 60% com métodos especiais (conforme [24] e [25]). Os métodos tradicionais geralmente são aplicáveis em todos os reservatórios, do ponto de vista físico, dependendo apenas da viabilidade econômica. Os métodos especiais, que alcançam valores altos de fator de recuperação, dependem de características físicas do reservatório para serem aplicáveis, além disso, são muito caros, devido aos preços dos produtos utilizados. Esses métodos são: métodos miscíveis (injeção de hidrocarbonetos, injeção de CO<sub>2</sub>), métodos térmicos (injeção

de água quente, injeção de vapor, combustão *in situ*) e métodos químicos (injeção de polímeros, injeção de solução micelar, injeção de solução álcali-surfactante-polímero).

Os métodos tradicionais têm se mostrado cada vez mais comuns, principalmente porque água é barata e, muitas vezes, sua injeção, além de pressurizar o reservatório, serve também para descartar este fluido, quando é separado do próprio óleo, porém estão limitados a um fator de recuperação de cerca de 45%. Muitos estudos são realizados para compreender melhor o fenômeno de líquido sendo deslocado por outro fluido em meio poroso com o intuito de aumentar o percentual de óleo retirado do reservatório.

Pode-se citar ainda como motivação do estudo da recuperação de líquido em meio poroso, o fato de haver um aumento contínuo no consumo mundial de petróleo, sem a garantia de que as descobertas aumentem na mesma proporção. Por exemplo, em 2011 a produção mundial de petróleo foi em média 83,58 milhões de barris por dia, enquanto o volume das reservas provadas foi de 1,653 trilhão de barris [23]. Supondo um fator médio de recuperação de 30%, o petróleo acabaria em 16,3 anos.

Devido à importância da aplicação do deslocamento de líquido por injeção de gás, esse fenômeno tem sido estudado por muitos autores nas últimas décadas, com muitas publicações sobre a análise da fração de massa perdida em função do número de capilaridade em tubos capilares. Porém, apesar de algumas semelhanças, o fluxo em meios porosos é significativamente mais complexo que nos tubos capilares, principalmente quando o escoamento é multifásico. A literatura mostra que, quando não há efeito de inércia, o número de capilaridade é o único parâmetro que influencia o fator de recuperação nos tubos capilares (Taylor [2] e Cox [3]), já nos meios porosos ocorre também a influência do tamanho da partícula que compõe o meio [7], [11] .

A análise experimental em meios porosos da massa perdida em função do número de capilaridade não foi suficientemente estudada, por essa razão, a comunidade científica e

industrial tem tido interesse em pesquisas nesse tema. O presente trabalho dá prosseguimento ao estudo de Xavier [7], que realiza o mesmo tipo de experimento, porém com um único fluido (tensão superficial  $\sigma = 57$  mN/m e viscosidade cinemática  $\nu = 39$  cSt). Neste trabalho, avalia-se os mesmos parâmetros de Xavier [7], porém insere-se um líquido mais viscoso e outro com baixa tensão superficial, para confirmar se o número de capilaridade é o único parâmetro dominante nesse processo. Também são mostrados aqui resultados para faixas mais amplas do número de capilaridade para algumas combinações de fluido em diferentes meios porosos.

O processo de um fluido deslocando outro no meio poroso é chamado de drenagem quando o fluido deslocado é o que molha preferencialmente o grão e, de embebição quando o fluido deslocante molha mais o meio poroso (Zhang et al [8]), por essa definição, no presente trabalho ocorre drenagem. Uma compreensão do fluxo bifásico (ou multifásico) em meios porosos é complicada devido ao grande número de fatores que influenciam, como viscosidade dos fluidos, massa específica, tensão superficial (ou interfacial), afinidade entre os fluidos, heterogeneidade do meio, vazão e escala de comprimento característica, e não está no escopo deste trabalho.

## 1.2 Estado da Arte

A literatura apresenta uma ampla quantidade de trabalhos numéricos e experimentais sobre escoamento de fluido em meios porosos dos tipos monofásico e multifásico, inclusive com injeção de fluido para deslocar outro fluido. Em contra partida, estudos analisando especificamente a massa perdida em função da capilaridade ainda são pouco explorados.

Nos meios porosos, devido às dimensões dos canais onde o fluido escoar, os fenômenos capilares se fazem presentes, por isso uma certa analogia com fluxo em tubos capilares é útil para entendimento do processo.

O estudo do deslocamento de um líquido empurrado por um gás em um capilar tem início com o trabalho experimental de Fairbrother e Stubbs [1], em 1935. Seu estudo consiste em injetar gás para deslocar um líquido viscoso no interior de um tubo capilar e medir a quantidade de massa que fica retida na parede do mesmo. Os autores definem o número adimensional  $\mu U / \sigma$ , onde  $\mu$  é a viscosidade do líquido,  $\sigma$  é tensão superficial entre o líquido e o gás e  $U$  é a velocidade da interface gás-líquido, assim como, eles propõem uma relação empírica para fração de massa perdida  $m$  na forma  $m = (\mu U / \sigma)^{1/2}$ . Posteriormente Taylor [2], em 1960, verifica que ao injetar gás sob pressão para deslocar um líquido muito viscoso em um tubo capilar, parte da massa de líquido fica retida na parede do tubo. Assim como Fairbrother e Stubbs [1], definem a fração de massa perdida como  $m = (U - \bar{u}) / U$ , onde  $\bar{u}$  é a velocidade média do líquido recuperado e  $U$  tem a mesma definição mencionada acima. Também chama a relação definida por Fairbrother e Stubbs [1] de Número de Capilaridade  $Ca = \mu U / \sigma$ , que é a razão entre as forças viscosas e as forças devidas aos efeitos capilares. O autor avalia a fração de massa perdida  $m$  em função de  $Ca$  e observa que para valores baixos do número de capilaridade  $Ca$ , a fração de massa perdida  $m$  cresce consideravelmente, ao passo que sua variação é menor para valores maiores de  $Ca$ , até  $m$  assintotizar aproximadamente em 0,56, quando o número de capilaridade se aproxima de 1,7. O autor ainda compara os resultados com aqueles do trabalho de Fairbrother e Stubbs [1], verificando que há uma boa concordância na região  $0 < Ca < 0,09$ . Acima desse valor as curvas de  $m$  divergem enormemente.

Cox [3] dá prosseguimento ao trabalho experimental de Taylor [2] e conclui que a fração de massa  $m$  retida na parede do tubo capilar assintotiza para um valor próximo de 0,60 quando o número de capilaridade se aproxima de 10. Porém, sua análise é adequada nos casos em que as forças causadas pela tensão superficial são desprezíveis quando comparadas com as forças viscosas, ou seja,  $\mu U / \sigma \gg 1$ .

Muitos estudos de escoamento de fluido não newtoniano empurrado por outro fluido em tubos capilares também são encontrados na literatura. Poslinsky et al [13], apresentam um estudo experimental do deslocamento de dois fluidos viscoplásticos em tubos e analisam a espessura da película de material depositada na parede em função do número de capilaridade. Seus resultados mostram que a película para um fluido viscoplástico é menor do que aquela depositada por um fluido newtoniano. Em um estudo numérico do deslocamento de líquido pseudoplástico e material viscoplástico em tubos capilares empurrados por injeção de gás, Sousa et al [14] analisam a fração de massa perdida  $m$  em função do número de capilaridade  $Ca$ , com análise dos efeitos de inércia conclui que para um fluido viscoplástico mais massa é depositada na parede do tubo em comparação com um fluido newtoniano. Soares et al [15] em 2001 apresentam um estudo numérico do escoamento de fluidos pseudo-plásticos em tubos capilares. Simulam a fração de massa retida na parede do tubo em função do número de capilaridade e do grau de pseudo-plasticidade, definido pelo expoente  $n$ . É feita uma comparação com os resultados experimentais de Taylor [2] e Cox [3] para o fluido newtoniano ( $n=1$ ), da fração de massa perdida  $m$  em função do número de capilaridade e verifica-se concordância entre estes estudos.

Soares et al [19] em 2006 avaliam, além de outros parâmetros, os efeitos de inércia na fração de massa perdida  $m$  quando gás desloca líquidos não newtonianos em tubos capilares. Concluem que  $m$  diminui com o aumento do número de Reynolds  $Re$ , a partir de

$Re \approx 2$ . São fixados dois valores do número de capilaridade,  $Ca = 0,6$  e  $Ca = 10$ , e percebe-se que a redução de  $m$  é mais acentuada na curva com o menor valor de  $Ca$ , os resultados são simulados para uma faixa de  $Re$  entre 0,01 e 450. Para a curva com  $Ca = 0,6$ , o valor de  $m$  decresce para 85% daquele sem efeito de inércia, quando  $Re = 100$ . Para a curva com  $Ca = 10$ , o valor de  $m$  decresce para 86% quando  $Re = 300$ , aproximadamente.

Fergui et al [4] em seu estudo usa um experimento similar ao do presente trabalho: um meio poroso artificial na posição vertical, onde é feita a injeção de nitrogênio para deslocar espumas (conhecido na literatura como “foam”) com diferentes concentrações de surfactante. Os autores apresentam a medição da massa de líquido recuperada em regime transiente, em função de diversos parâmetros. Não consta a massa recuperada em função do número de capilaridade, mas outros efeitos podem ser comparados com o presente trabalho, como por exemplo, o efeito da adição de surfactante na fração de massa recuperada e o tempo de passagem do fluido pelo meio poroso, comumente chamado de “breakthrough time” na literatura. Por esse parâmetro é possível mostrar que o volume recuperado cresce rapidamente até um valor máximo de aproximadamente 75%, quando a concentração atinge 0,3%. Daí em diante o volume recuperado declina suavemente, atingindo 48% para uma concentração de 1%. Apesar da similaridade experimental, pouco se pode comparar com este estudo, pois em cada gráfico os autores fixam a vazão de gás e variam a concentração de surfactante. A queda de pressão também é avaliada em função do volume injetado e da concentração.

Grattoni et al [5] em seu estudo experimental analisam a recuperação da massa de óleo e água pela injeção de gás no interior de meios porosos, em função de dois parâmetros adimensionais: o número de capilaridade e do número de Bond (razão entre a força de gravidade e as forças devidas à tensão superficial). Os autores afirmam que esses dois grupos adimensionais quando analisados separadamente não descrevem tão bem o fluxo

trifásico de óleo, água e gás, na presença de drenagem gravitacional, por isso definem um número adimensional  $N$ , que é a relação entre o número de capilaridade e o número de Bond, e mostram uma relação linear entre o parâmetro  $N$  e o fator de recuperação total de líquido no meio poroso. A recuperação de óleo aumenta com o decréscimo da velocidade do gás, aproximando de 70% quando a velocidade do gás tende a zero.

App & Mohanty [6] fazem um estudo numérico do escoamento de gás e líquido próximos às condições de temperaturas e pressões críticas em meio poroso saturado, em regime permanente, relacionando as permeabilidades relativas (conforme definido em [24]) com o número de capilaridade e o número de Reynolds. Concluem que as permeabilidades relativas aumentam com o número de capilaridade e diminuem com a inércia. Assinalam que efeitos de inércia podem reduzir a permeabilidade relativa na região próxima ao poço de um reservatório de condensado e gás, devido à alta velocidade que desenvolve no fluxo radial convergente de gás e condensado em um poço. Efeitos de inércia para a fase líquida são normalmente considerados insignificantes. Para um escoamento multifásico, os efeitos de inércia são dependentes da saturação do líquido. Para alta vazão em escoamento multifásico, o número de capilaridade depende da permeabilidade relativa.

Para as propriedades dos fluidos é usada a equação de estado de Peng Robinson modificada com 10 termos. App & Mohanty [6] consideram que há efeito de inércia no escoamento do gás e que não existe esse efeito no fluxo do líquido. Relatam que efeitos de inércia para fluxo em meio poroso tornam-se importantes para número de Reynolds acima de 0,1. Finalmente concluem que efeito de inércia reduz a permeabilidade do gás para aproximadamente 25%, ocasionando em maior recuperação de líquido.

Xavier [7] realiza um estudo experimental sobre a recuperação de líquido por injeção de gás em meio poroso artificial constituído por esferas de vidro. Eles analisam a fração de massa perdida em função da capilaridade e do diâmetro médio dos grãos. Em seu trabalho,

três meios são estudados, mostrando que a fração de massa perdida  $m$  cresce com a capilaridade ( $Ca$ ) até  $Ca \approx 0,01$ ; para valores maiores de  $Ca$  a massa perdida não varia mais. Por outro lado, quanto maior o diâmetro médio das esferas, menor é a massa perdida, praticamente para todos os valores de capilaridade. A fração de massa perdida tende para uma reta horizontal nos valores aproximados de  $m = 0,90$ ,  $m = 0,85$  e  $m = 0,80$ , para os meios de menor diâmetro, intermediário, e de maior diâmetro das esferas, respectivamente. Há uma grande variação da massa perdida na faixa de capilaridade entre 0 e 0,01, para todos os meios mostrados neste estudo. O gás injetado é o nitrogênio e o líquido utilizado é uma solução de 67% de água e 33% de polietileno glicol (PEG, em base mássica). O autor usa um meio com esferas de 0,50 a 0,90 mm de diâmetro, outro com 1,0 a 1,4 mm, e um terceiro com 1,4 a 2,0 mm de diâmetro, a faixa de capilaridade vai de zero até 0,05. Os autores concluem que o número de capilaridade é o parâmetro governante do escoamento em meios porosos na recuperação de líquido, assim como em tubos capilares, baseado na hipótese de que estes meios são constituídos por poros de dimensões capilares, com a diferença de que nos meios porosos a curva de massa perdida assintotiza para valores do número de capilaridade bem menores que nos tubos capilares. Os autores mostram ainda que a massa perdida em seu estudo é significativamente maior que nos tubos capilares.

Zhang et al [8] estudam experimentalmente a influência de forças viscosas e capilares no deslocamento de fluidos imiscíveis em meios porosos constituídos de micromodelos, que são redes porosas gravadas no processo de fabricação de alguns materiais, como silicone, vidro e resina de poliéster. Apresentam resultados de uma série de experimentos de drenagem em micromodelos de fluidos que molham e não molham o leito sobre uma grande faixa de número de capilaridade e razão de viscosidades (definida como a relação entre a viscosidade do fluido que não molha e a viscosidade do fluido que molha o meio  $M = \mu_n/\mu_w$ ). Eles descrevem o deslocamento de sete pares de fluidos imiscíveis com razão de



viscosidade variando de 4 ordens de magnitude (de  $M = 0,0112$  a  $75,9$ ), para taxas de injeção variando de 3 ordens de magnitude e para números de capilaridade variando sobre 4 ordens de magnitude (de  $Ca = 1,32 \times 10^{-6}$  a  $0,0955$ ). Os autores usam várias combinações de fluido, dois que molham preferencialmente o meio, água e polietileno glicol 200 (PEG200), com quatro fluidos que não molham preferencialmente o meio, hexano, duodecano, hexadecano e óleo mineral pesado.

No trabalho de Zhang et al [8] o fluido que não molha preferencialmente o meio é injetado para deslocar o fluido que molha preferencialmente até que a saturação deste último não varie mais com o tempo, isto se dá quando uma quantidade de fluido deslocante correspondente a mais de 10 volumes dos poros injetados no leito poroso. Usando técnica de microscopia, iluminação fluorescente e filtros de comprimento de onda, os autores conseguiram imagens nítidas dos dois fluidos separadamente, mostrando os tipos diferentes de escoamento, *fingering* (frentes de escoamento) capilares, *fingering* viscosos e deslocamento estável ou instável. Os autores concluem que a saturação do fluido deslocante (fluido que não molha,  $S_{wn}$ ) aumenta com o aumento de  $Ca$  para todos os pares de fluidos, ou seja, a saturação do fluido que molha,  $S_w$ , (massa perdida) diminui. Explicam fisicamente que para altas vazões, muitos *fingers* viscosos formam-se e recupera a maioria do fluido deslocado.

Lenormand et al [9] estudam o comportamento da pressão capilar em gargantas de poros e concluem que na ausência de forças viscosas e sem efeitos gravitacionais (leito horizontal), o deslocamento de um fluido que molha empurrado por um fluido que não molha o meio é governado por forças capilares e, o fluido que não molha não é capaz de entrar no meio poroso espontaneamente. O fluido que não molha pode somente entrar em uma garganta porosa com um raio  $r$  quando a pressão capilar (diferença entre a pressão do fluido que não molha e do fluido que molha o meio) excede o valor na entrada,  $Pe = 2\sigma_{nw}/r$ , onde

$\sigma_{nw}$  é a tensão interfacial entre os dois fluidos. Sob essas condições, a distribuição de pressão em ambos os fluidos é uniforme e o tamanho dos poros controla o processo de deslocamento. Uma frente de deslocamento avança por invadir a maioria dos corpos porosos e gargantas disponíveis e permite ter a menor resistência capilar. Quando forças viscosas também tornam-se importantes, a distribuição de pressão torna-se não-uniforme e as diferenças de pressão podem forçar o fluido que não molha dentro de pequenas gargantas de poros. Lenormand et al [9] reportam ainda que no estudo de escoamento de fluidos em meios porosos, recentes avanços em métodos de microfabricação têm permitido construir sistemas de poros com formas bem definidas, por exemplo circulares ou retangulares, moldando poros e gargantas.

Algharaib et al [10] realizam um estudo numérico de deslocamentos imiscíveis em meios porosos com paredes horizontais, avaliando a influência de efeitos gravitacionais e do número de capilaridade, definido por eles como  $Ca = (\sigma k_{ro} / \mu_o) / (Lu_T) \sqrt{\phi k_x}$ , onde  $k_{ro}$  é a permeabilidade relativa do óleo,  $\mu_o$  é a viscosidade do óleo,  $\sigma$  é a tensão interfacial,  $u_T$  é a velocidade superficial,  $L$  é o comprimento característico,  $\phi$  é a porosidade e  $k_x$  é a permeabilidade absoluta. Observando na fórmula de  $Ca$  acima vê-se que os autores definem o número de capilaridade como a razão das forças capilares e as forças viscosas, o inverso dos outros trabalhos encontrados na literatura.

Jamaloei et al [11] examina experimentalmente os efeitos do tamanho da garganta do poro e da vazão de injeção no número de capilaridade. Eles definem três números de capilaridade diferentes, porém, todos são uma relação entre as forças viscosas e forças devidas à tensão interfacial, relatam ainda que há mais de vinte formas distintas deste parâmetro adimensional na literatura. Seus experimentos consistem de três meios porosos (micromodelos com garganta dos poros medindo 280  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$  e 110  $\mu\text{m}$ ) construídos de

vidro transparente para visualização, que são preenchidos com petróleo e salmoura, depois um polímero contendo surfactante é injetado no leito para deslocar os dois fluidos. A tensão interfacial é de 0,011 mN/m (solução polimérica-petróleo) e 8,85 mN/m (salmoura-petróleo). Em seu estudo, os autores concluem que a quantidade de óleo recuperado no *breakthrough* aumenta com a redução no tamanho do poro, mas diminui com o aumento na vazão injetada (aumento da velocidade). No meio poroso com garganta de 110  $\mu\text{m}$ , o fator de recuperação é de aproximadamente 0,558, 0,526 e 0,515, para as vazões injetadas de  $3,33 \times 10^{-12}$ ,  $6,67 \times 10^{-12}$  e  $1,00 \times 10^{-11}$   $\text{m}^3/\text{s}$ , respectivamente.

### 1.3 Caracterização do Problema

O presente trabalho faz uma análise experimental da quantidade de massa que pode ser retirada de um meio poroso artificial, composto por esferas de vidro, onde um líquido se desloca sendo empurrado por ar. É avaliada a influência da capilaridade e do diâmetro das partículas que compõem o meio poroso. Muitos experimentos foram feitos com número de Reynolds desprezível, para dar a certeza que nenhum outro parâmetro, além da capilaridade, influenciasse os resultados. Uma análise qualitativa também foi feita com número de Reynolds não desprezível.

As esferas de vidros são montadas dentro de um tubo de acrílico na posição vertical, conforme Figura 2.1, formando um meio com porosidade que varia de 0,36 a 0,40, sendo os valores mais comuns em torno de 0,38, quatro meios porosos foram utilizados, com diâmetros médios de 0,73 mm, 1,14 mm, 1,65 mm e 1,91 mm. Um líquido transparente e viscoso, uma solução de polietileno glicol (PEG), é inserida no meio poroso. Depois o ar é injetado na parte superior, empurrando o líquido para baixo até que a frente de ar alcance a saída na parte inferior do tubo, neste momento interrompe-se o fluxo e mede-se em uma

balança de precisão a massa de líquido que é recuperada. Foram realizados mais de 100 experimentos, variando a vazão de ar injetada, o diâmetro das esferas que compõem o leito poroso e algumas propriedades do líquido recuperado. Todo o estudo é realizado em regime permanente, pois considera-se a vazão de ar injetada e as velocidades  $U$  (frente de gás) e  $\bar{u}$  (massa recuperada) como constantes. Outro fato para o tratamento em regime permanente deste tipo de problema é adotar o referencial estacionário na frente da interface gás líquido e considerar que o tubo se move com velocidade  $U$  para a esquerda (ver Figura 2.10).

O objetivo do trabalho é estudar a fração de massa perdida (massa de líquido que fica retida no meio poroso) em função do número de capilaridade (adimensional), definido por Taylor [2]:

$$Ca = \frac{U\mu}{\sigma} \quad (2.1)$$

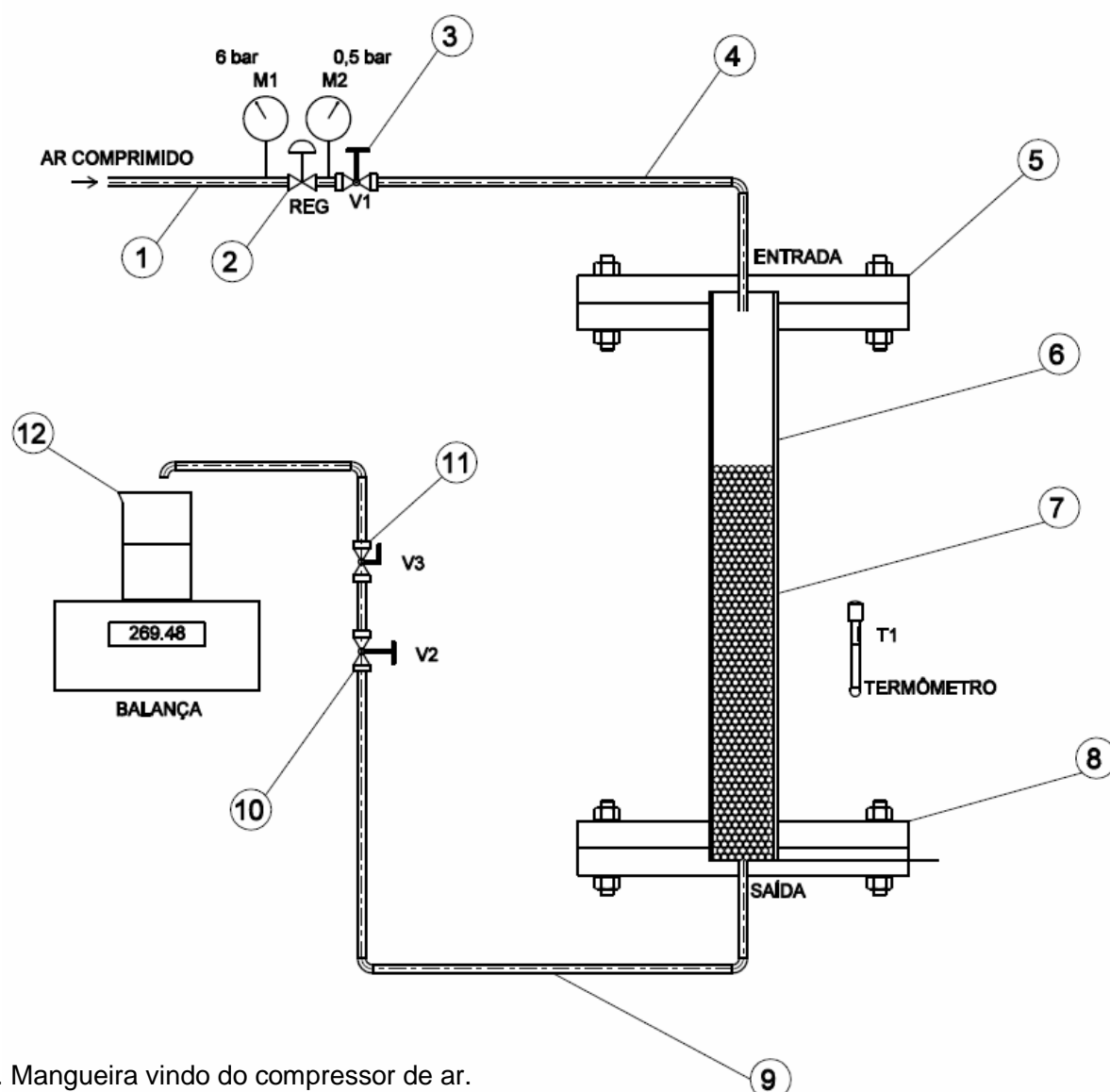
Onde  $U$  é a velocidade da frente de gás que empurra o líquido no meio poroso,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do líquido, e  $\sigma$  é a tensão superficial entre o líquido e o gás.

É também avaliada a influência do diâmetro médio das partículas do leito na fração de massa perdida. A variação do número de capilaridade é obtida principalmente pela mudança da vazão (ou velocidade) do ar injetado, variável mais fácil de ser controlada. Entretanto, em alguns experimentos, varia-se a viscosidade ou a tensão superficial para certificar-se se há efeitos de parâmetros dimensionais. Para variar a viscosidade modifica-se a concentração de PEG na solução com água. Com esta mistura obtém-se uma faixa bem ampla de viscosidade cinemática, desde 1 mm<sup>2</sup>/s (água pura) até 200 mm<sup>2</sup>/s (50% PEG), sem alterações significativas na tensão superficial. Para variar esta última propriedade, é adicionado álcool etílico à solução de água-PEG, atingindo-se aproximadamente a metade da tensão superficial com adição de 35% de álcool.

## Capítulo 2

# Abordagem Experimental

Neste capítulo é mostrado em detalhe como são montados e realizados os experimentos com o meio poroso e os métodos para obtenção dos resultados. Primeiramente, é feita uma descrição detalhada sobre a separação das esferas de vidro para montagem dos meios porosos com diferentes tamanhos de grãos, depois são relatados os métodos adotados para a medição dos diâmetros das esferas e a frequência de distribuição desses diâmetros em cada um dos meios. Em seguida descreve-se como são preparados os fluidos de teste e a medição de suas propriedades: viscosidade, massa específica e tensão superficial. São também mostrados os procedimentos adotados para obtenção da porosidade, da vazão de líquido, da fração de massa perdida, da velocidade média da massa recuperada  $\bar{u}$ , da velocidade média da interface gás-líquido e do número de capilaridade. Por fim é apresentada a seqüência de atividades para realização de cada experimento, desde a montagem do meio poroso e colocação do fluido até sua desmontagem e secagem das esferas para um novo experimento.



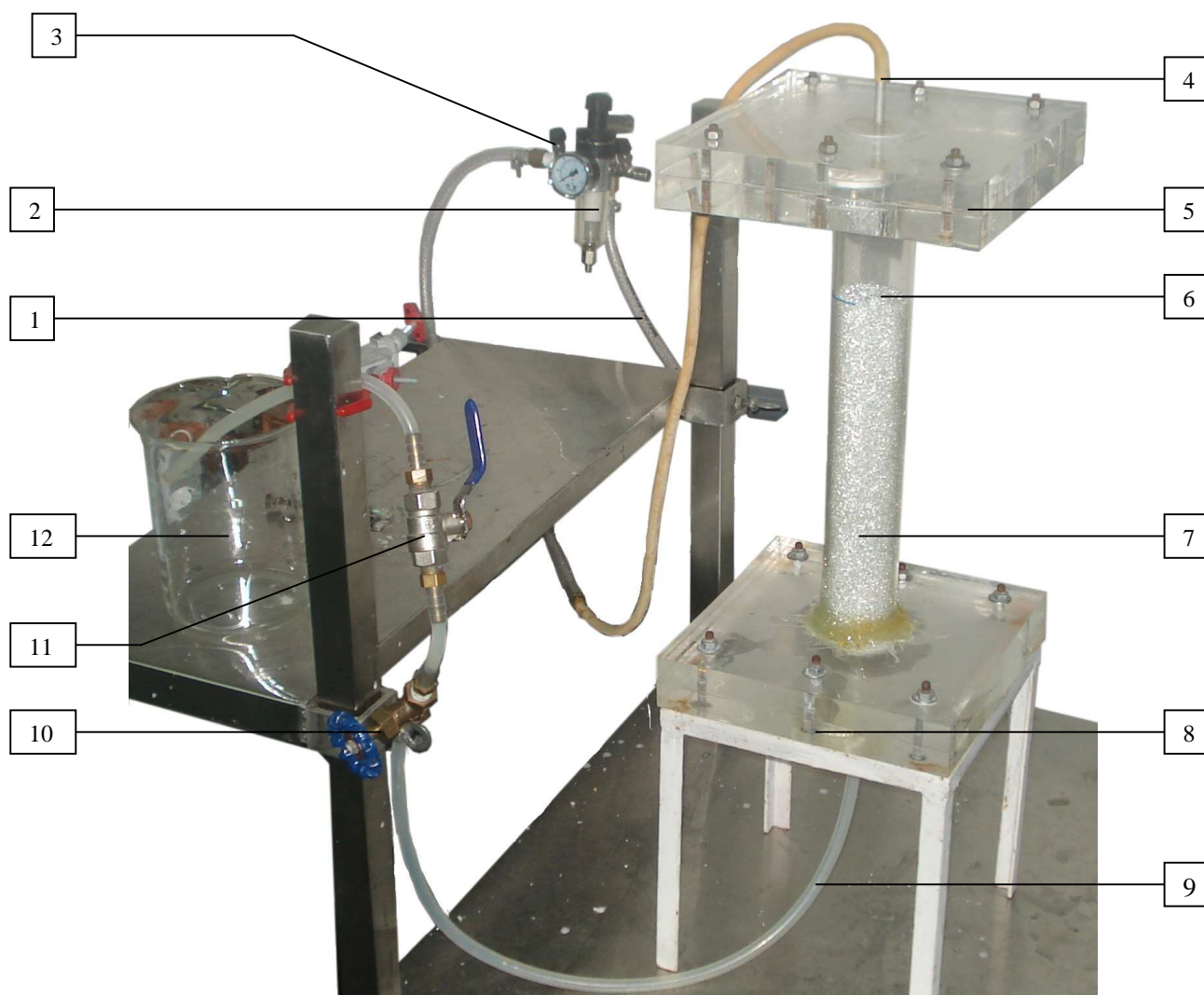
1. Mangueira vindo do compressor de ar.
2. Regulador de pressão.
3. Válvula de entrada do meio poroso.
4. Mangueira de ar (entrada do meio poroso).
5. Tampa superior aparafusada.
6. Tubo de acrílico preenchido com esferas de vidro.
7. Meio poroso.
8. Tampa inferior aparafusada.
9. Mangueira de saída do meio poroso.
10. Válvula de regulação à jusante do meio poroso.
11. Válvula de bloqueio á jusante do meio poroso.
12. Becker para recolher o líquido retirado do meio poroso.

**Figura 2.1:** Desenho esquemático do sistema montado para os experimentos.

A Figura 2.1 mostra o sistema montado para realização dos experimentos. O meio poroso é constituído por esferas de vidro com diâmetro entre 0,50 mm e 2,0 mm, colocadas dentro de um tubo de acrílico fechado com tampas aparafusadas nas partes superior e inferior. Na extremidade inferior do tubo é colocada uma tela de aço inoxidável para evitar que as esferas sejam carregadas pelo fluido. A mangueira de silicone conectada na tampa superior conduz ar comprimido vindo do compressor e pela mangueira ligada na tampa inferior passa o líquido que é retirado do meio poroso.

O componente principal do sistema mostrado na Figura 2.1 é um tubo de acrílico cujas dimensões estão mostradas na Figura 2.3. A altura do meio poroso (região do tubo de acrílico preenchida com esferas de vidro) é de 261,8 mm. O tubo possui dois flanges em suas extremidades, onde duas tampas são presas, cada uma com seis parafusos. Na tampa de baixo é colocada uma tela para impedir que as esferas desçam na mangueira.

Para efetuar o deslocamento do líquido é utilizado ar comprimido proveniente de um compressor do tipo odontológico (isento de óleo lubrificante). O ar comprimido, que passa em um separador de umidade, chega ao sistema com uma pressão de 6 bar. O regulador (REG) controla a pressão na entrada do meio poroso em 0,5 bar, enquanto a vazão é controlada na válvula globo V2, localizada a jusante do meio poroso. A válvula esfera V3, também a jusante do meio poroso, serve para iniciar e terminar o experimento. A mangueira na saída do meio poroso permanece cheia de líquido durante o experimento, por este motivo, seu volume é medido para ser contabilizado nos cálculos da fração de massa perdida.



1. Mangueira vindo do compressor de ar.
2. Regulador de pressão.
3. Válvula de entrada do meio poroso.
4. Mangueira de ar (entrada do meio poroso).
5. Tampa superior aparafusada.
6. Tubo de acrílico preenchido com esferas de vidro.
7. Meio poroso.
8. Tampa inferior aparafusada.
9. Mangueira de saída do meio poroso.
10. Válvula de regulação à jusante do meio poroso.
11. Válvula de bloqueio à jusante do meio poroso.
12. Becker para recolher o líquido retirado do meio poroso.

**Figura 2.2:** Sistema utilizado para realização dos experimentos.



O equipamento utilizado para fazer os experimentos não é automatizado, pois não há necessidade de controle rigoroso de temperatura (do fluido), vazão, ou pressão. As grandezas medidas com precisão são apenas a massa de líquido retirada do leito poroso e o tempo de passagem. A temperatura do ambiente é controlada pelo ar condicionado do laboratório, com o objetivo de garantir que as propriedades do líquido não variem durante o experimento. Um termômetro permanece ligado ao lado do equipamento e observa-se a variação de  $0,1^{\circ}\text{C}$  a  $0,3^{\circ}\text{C}$  durante o experimento. A pressão é controlada pelo regulador (2) e a vazão pela válvula de regulação (9). Porém os valores dessas variáveis não são computados no resultado, os dados que de fato são utilizados é a massa colocada no leito, a massa recuperada, e o tempo de passagem. A massa perdida é calculada como a massa colocada no sistema subtraída da massa recuperada. A vazão do líquido é calculada simplesmente como a massa recuperada dividida pelo tempo de passagem. Com estes três parâmetros e as propriedades do líquido calcula-se todos os outros parâmetros importantes para o problema, como número de capilaridade, número de Reynolds, etc.

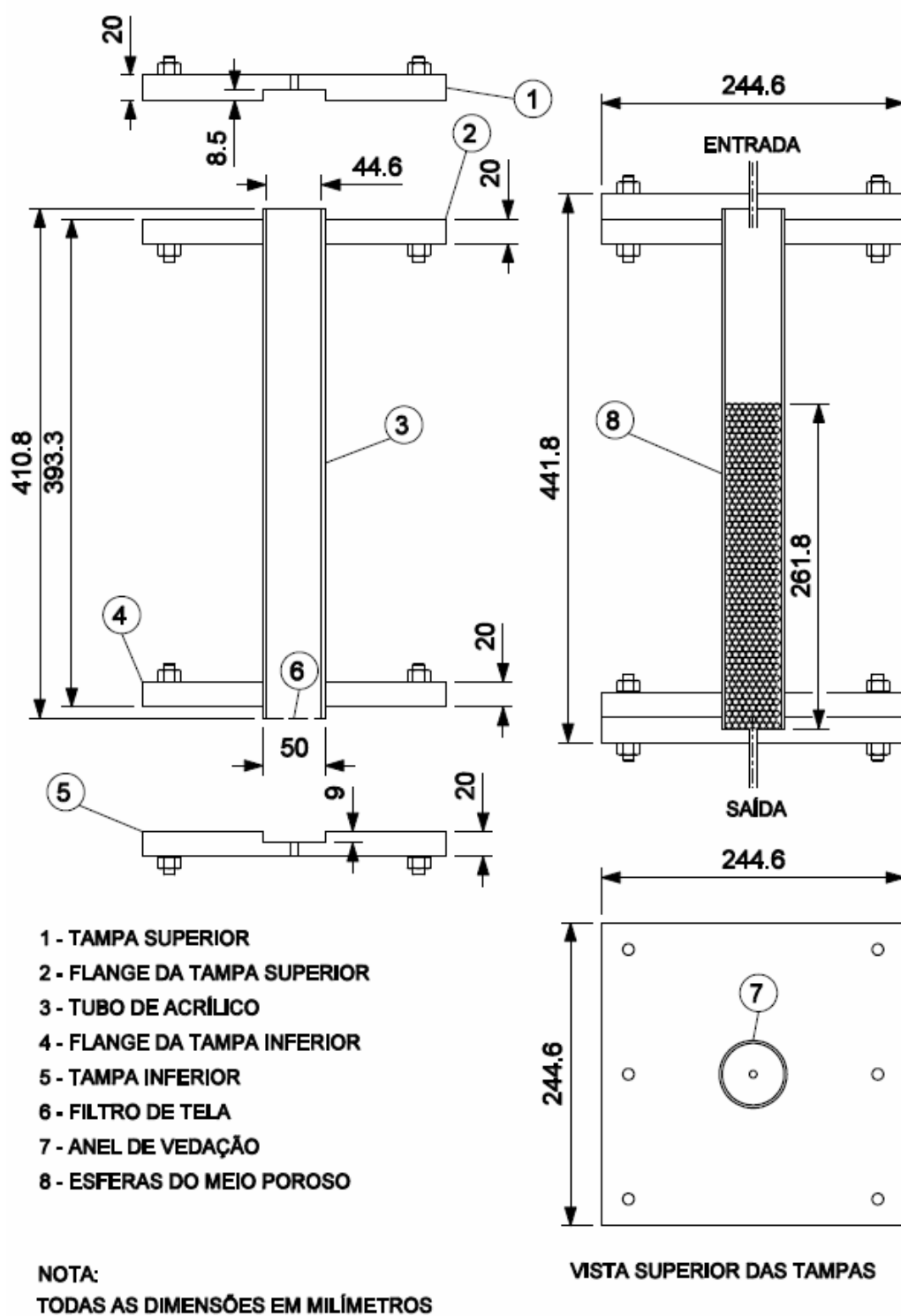


Figura 2.3: Detalhes e dimensões dos componentes do sistema.

## 2.1 Separação das esferas de vidro

Os meios porosos utilizados nos experimentos são feitos com esferas de vidro transparente, que são adquiridas comercialmente em três grupos: um com diâmetro entre 0,50 e 0,90 mm, outro de 0,90 a 1,4 mm, um terceiro entre 1,4 e 2,0 mm. As esferas são separadas para obtenção de faixas mais estreitas de diâmetros, como mostrado na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1:** Meios porosos utilizados nos experimentos.

Meio Poroso	Faixa de Diâmetro (mm)	Diâmetro Médio (mm)
Meio 1	0,50 a 0,85	0,73
Meio 2	1,00 a 1,18	1,14
Meio 3	1,4 a 1,8	1,65
Meio 4	1,8 a 2,0	1,91

As esferas são separadas em peneiras granulométricas com malha de aço inoxidável, encontradas no mercado com as seguintes aberturas: 0,50 mm, 0,85 mm, 1,0 mm, 1,18 mm, 1,4 mm, 1,6 mm, 1,8 mm e 2,0 mm.

Para a separação das esferas é usado o peneirador mecânico da marca *Granutest*. As peneiras são montadas em uma pilha vertical, onde as de menor abertura são colocadas na parte inferior e as de maior abertura na parte superior. Dessa forma, garante-se que as esferas que passam na peneira tem seu diâmetro menor que a abertura (dentro da incerteza da própria peneira), mas as esferas que ficam na peneira, não são todas maiores que o tamanho da abertura, já que muitas são impedidas de chegar até a malha por outras esferas que obstruem o caminho. Desta forma, é preciso peneirar cerca de 12 vezes cada amostra, em um tempo de aproximadamente 11 minutos cada peneirada. Até mesmo o volume de esferas usado no processo influencia a separação, observou-se que se a peneira estiver

muito cheia, poucas esferas atingem a malha e quando está muito vazia, o volume peneirado é pequeno. É verificado que uma altura de 2 cm na camada de esferas resultava em maior eficiência. O peneirador utiliza dois movimentos vibratórios, um na horizontal e outro na vertical. O processo de separação através das peneiras granulométricas requer todo cuidado para que algumas esferas permaneçam no meio poroso errado e também para otimização do tempo de peneiramento. Para isso descreve-se abaixo os procedimentos utilizados.

Para otimização do processo de separação é feito um teste referente ao volume de esferas colocado na peneira, com a duração de três minutos para cada etapa, usando a peneira com abertura de 1,8 mm (com os furos totalmente desentupidos inicialmente) e esferas com diâmetro entre 1,4 e 2,0 mm. Os resultados estão descritos na Tabela 2.2 seguinte:

**Tabela 2.2:** Volume de esferas filtrado em função do volume colocado.

Tempo de peneiramento 3 minutos. Peneira de 1,8 mm						
Volume Colocado (ml)	100	200	250	300	400	600
Volume Filtrado (ml)	7	10	13	13	13	13

Um outro teste foi realizado com volume fixo de 250 mm e variando o tempo, conforme mostrado na Tabela 2.3. Observa-se que de 1 minuto para 3 minutos a quantidade de esferas peneiradas teve um aumento de 2,6 vezes (de 5 ml para 13 ml), porém acima de 4 minutos o aumento não é muito significativo. Isto porque algumas esferas obstruem os furos das peneiras e impedem que outras passem.

**Tabela 2.3:** Volume de esferas filtrado em função do tempo de peneiramento.

Volume de esferas fixado em 250 ml. Peneira de 1,8 mm.						
Tempo (min)	1	2	3	4	5	6
Volume Filtrado (ml)	5	6,5	13	19	21	23

Diante destes resultados é adotado um volume de 250 ml e um tempo de 4 minutos para cada peneirada manual. Posteriormente passou-se a usar um peneirador motorizado e mudou-se o tempo de peneiramento para 7,5 minutos.

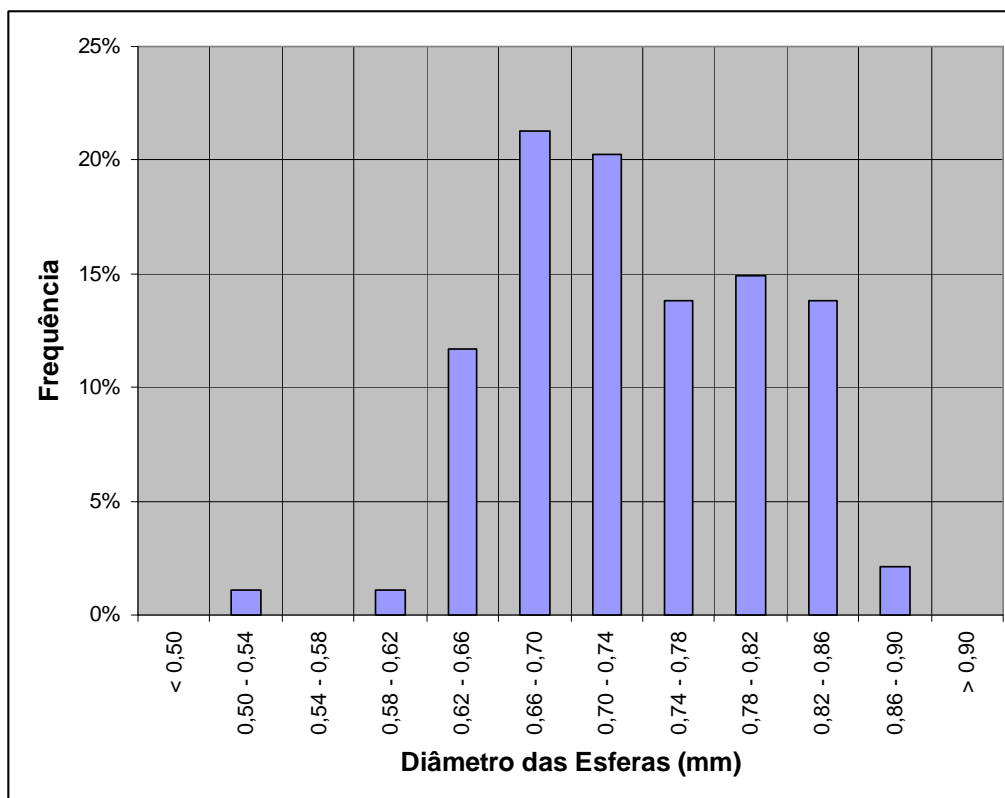
Uma amostra deve ser passada várias vezes pela mesma peneira com o objetivo de retirar as esferas que possuem o diâmetro menor que a abertura da tela, pois muitas esferas pequenas ficam impedidas pelas esferas maiores de alcançar essa abertura. Como exemplo de quão trabalhoso é esse processo pode-se citar o seguinte: Ao tomar a amostra com esferas de diâmetro entre 1,4 a 2,0 mm, após passá-la exaustivamente pela peneira com abertura de 1,6 mm, peneirando-a na tela de 1,8 mm constata-se que, na 15ª vez passam 75 mm de esferas na abertura, na 16ª vez passam 50 ml, e seguindo tem-se na 17ª vez (25 ml), 18ª vez (20 ml). Após a 18ª vez que o meio com esferas com diâmetro de 1,4 a 2,0 mm é peneirado constatou-se que nenhuma esfera passava pela peneira de 1,8 mm. Assim é definido um meio que contém APENAS esferas com diâmetro superior a 1,8 mm. Porém quando medem-se estas esferas, ainda encontra-se uma pequena quantidade (cerca de 10%) com diâmetro inferior a 1,8 mm, isto pode ser atribuído a erros de medições, erro na granulometria da peneira ou ainda que estas esferas menores não alcançam os furos, impedidas por outras maiores. Vale lembrar ainda que o teste mencionado acima com tempo fixo de três minutos e o outro feito com volume fixo de 250 ml foi realizado com movimentos

manuais da peneira. Já o teste feito para verificar quantas vezes uma amostra deve ser peneirada foi realizado no peneirador mecânico, assim também constatou-se que no peneirador mecânico consegue-se passar um volume de esferas bem maior do que quando se usa o processo manual, para o mesmo tempo e as mesmas condições. Isto se dá ao fato de que a máquina impõe dois movimentos oscilatórios, um na horizontal e outro na vertical, além de maiores acelerações e, conseqüentemente, maiores forças para empurrar as esferas pelos furos das peneiras.

## **2.2 Determinação dos Diâmetros das Esferas e Distribuição em Frequência**

Para medição do diâmetro das esferas é utilizada a máquina da marca *Tesa*, modelo V-200, no laboratório de Metrologia da UFES. Este aparelho mede com precisão de 2  $\mu\text{m}$ . As medições são feitas em duas direções, avaliando os erros de circularidade das esferas. Para a medição dos diâmetros são montados cartões com as esferas coladas, mantendo-se um espaço adequado entre elas. Após a separação das esferas com as peneiras granulométricas nas diversas faixas de diâmetros, é feita a distribuição das frequências dos diâmetros para cada faixa utilizada nos experimentos.

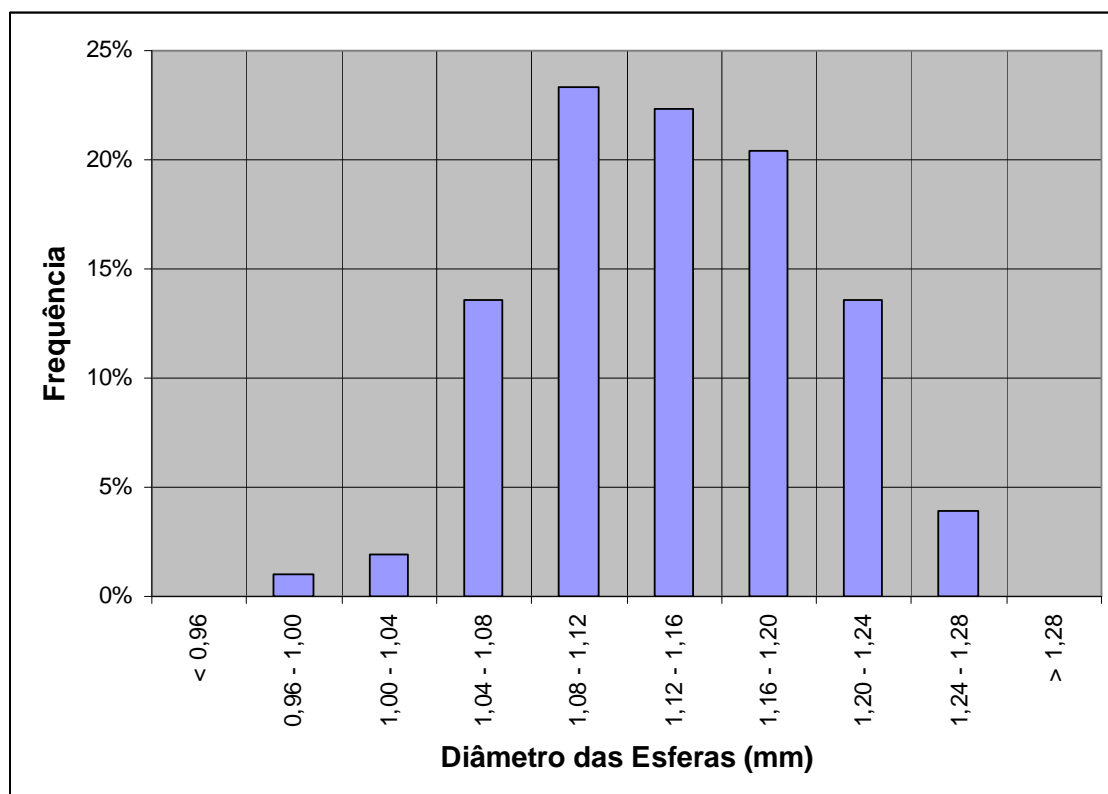
Para o meio poroso 1, separado por peneiras com abertura entre 0,50 a 0,85 mm, encontrou-se que 96% das esferas possuem diâmetro na faixa de 0,62 a 0,86 mm, com apenas 2% abaixo e 2% acima dessa região, como pode ser visto na Figura 2.4. Observa-se neste conjunto que a maioria das esferas concentram-se mais próximas do limite superior do que do limite inferior da faixa de diâmetro, ou seja, há poucas esferas no lado esquerdo do gráfico.



**Figura 2.4:** Frequência de distribuição dos diâmetros das esferas da faixa 0,50 a 0,85 mm.

Para o meio poroso 2, separado pelas peneiras com abertura entre 1,00 mm e 1,18 mm, encontrou-se que 93% das esferas possuem diâmetro na faixa de 1,04 a 1,24 mm, com 3% abaixo e 4% acima dessa extensão. Neste meio poroso a distribuição se aproxima da curva normal, entretanto como nos outros meios, há maior concentração de esferas em torno do limite superior (1,18mm) do que próximas ao limite inferior nominal (1,00 mm). Esse resultado pode ser devido a erros na granulometria das peneiras como também do processo de peneiramento. A segunda causa é mais coerente, já que a mesma característica se repete para os outros meios porosos. O diâmetro médio desse meio é 1,14 mm. Outro fato é que estas esferas são separadas de um conjunto mais amplo, que está na faixa de 1,0 a 1,4 mm,

conforme embalagem encontrada no mercado, se as esferas já forem fabricadas assim, os extremos são menos populosos.

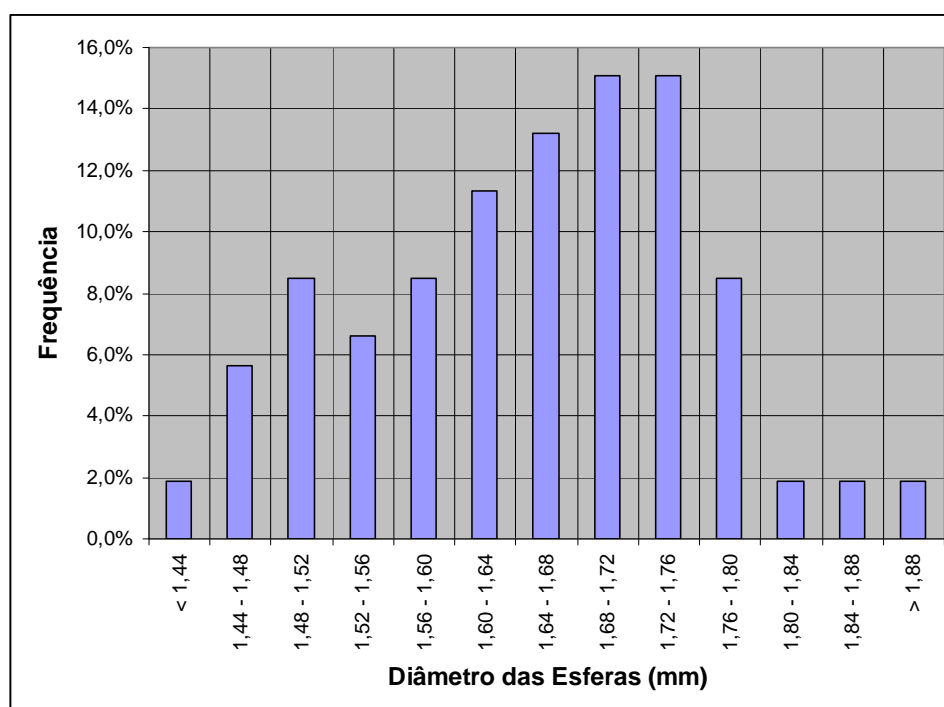


**Figura 2.5:** Frequência de distribuição dos diâmetros das esferas da faixa 1,00 a 1,18 mm.

Para o meio poroso 3, separadas por peneiras com abertura entre 1,4 e 1,8 mm, encontrou-se que 5,7% das esferas tem diâmetro maior que 1,80 mm, apenas 1,9% possui diâmetro menor que 1,44 mm. A faixa nominal deste meio é mais ampla, e vemos que 30% das esferas estão entre 1,68 e 1,76 mm. O diâmetro médio é 1,65 mm, indicando que tem-se um número maior de elementos concentrados à direita no gráfico da Figura 2.6. O fato de



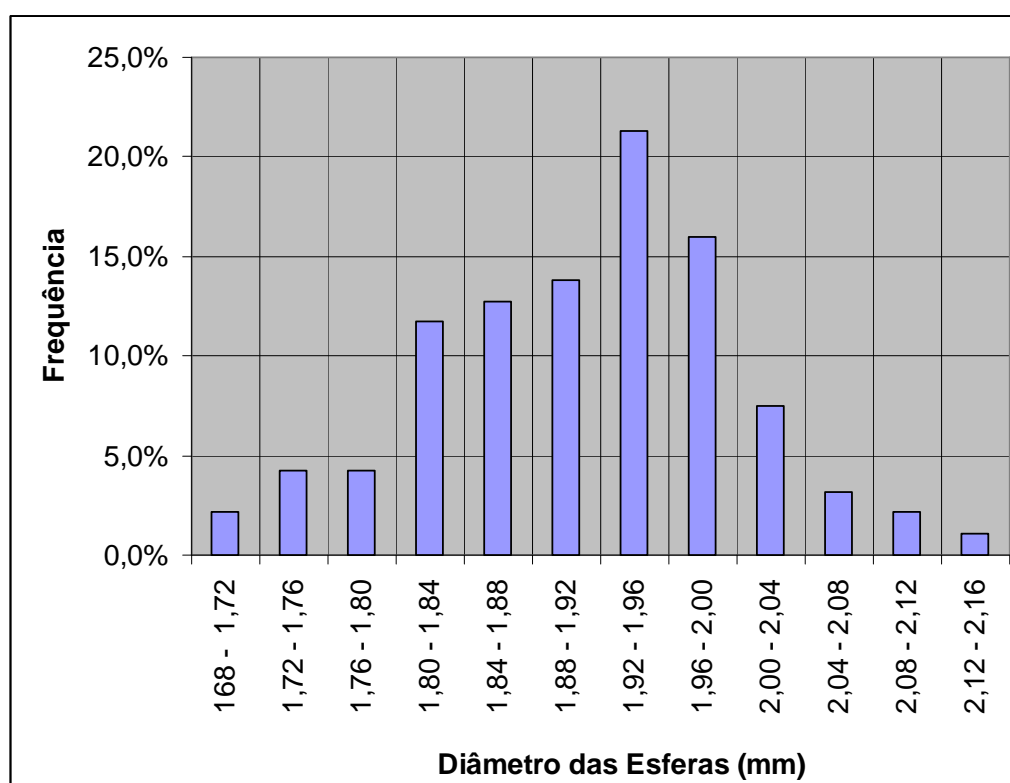
que algumas esferas ultrapassam a faixa de peneiramento ( $d > 1,80$  mm), pode ser por imprecisões na abertura da peneira ou no próprio processo de separação.



**Figura 2.6:** Freqüência de distribuição dos diâmetros das esferas da faixa 1,4 a 1,8 mm.

Para o meio poroso 4, separados por peneiras com abertura entre 1,8 e 2,0 mm, encontrou-se que 75,6% das esferas possuem diâmetro nesse intervalo, 10,7% estão abaixo e 13,8% estão acima dessa faixa, como mostra a Figura 2.6. O limite superior não é peneirado e as esferas maiores que 2,0 mm são decorrentes do material fornecido pelo fabricante. Aquelas com diâmetros menores que 1,80 mm são decorrentes das imprecisões da malha das peneiras ou do processo de separação, ou seja, de alguma esfera que não

chegou à malha, impedida por outras de maior diâmetro, mesmo após várias repetições na peneiração.



**Figura 2.7:** Frequência de distribuição dos diâmetros das esferas da faixa 1,80 a 2,0 mm.

## 2.3 Caracterização dos Fluidos de Teste

Os líquidos utilizados nesta análise experimental são soluções de água com polietileno glicol (PEG), ou água com álcool e PEG. O PEG é utilizado para aumentar a viscosidade do fluido, enquanto o álcool é adicionado à mistura para diminuir a tensão superficial. O PEG é

escolhido porque com a adição desse polímero na água é possível variar a viscosidade da mistura em cerca de mais de 200 vezes, sem variação considerável na tensão superficial e na massa específica, e também é um material de fácil limpeza. São utilizadas soluções com concentrações em massa variando de 20 a 50%, sendo os mais utilizados na faixa de 33% de PEG e 67% de água. Quanto maior a concentração desse polímero na água, maior é a viscosidade.

A Tabela 2.4 mostra os valores das propriedades dos fluidos utilizados nos experimentos, veja que a massa específica e a tensão superficial são medidas nas temperaturas de 20 e de 25°C, enquanto a viscosidade cinemática é medida a 20, 22,5 e 25°C, devido ao fato dessa propriedade sofrer maior variação com a temperatura. Os experimentos são realizados com fluido entre 20 e 25°C, e as propriedades para cada experimento são obtidas por interpolação linear.

**Tabela 2.4.** Propriedades dos fluidos utilizados nos experimentos.

Propriedade	T (°C)	Fluido 1	Fluido 2	Fluido 3	Fluido 4
		34%PEG	52%PEG	35%Álcool 30%PEG	43%PEG
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	20,0	1065,3	1092,1	981,7	1074,5
	25,0	1062,3	1091,8	978,9	1070,7
$\sigma$ (mN/m)	20,0	55,10	51,53	28,48	51,31
	25,0	54,27	50,33	28,32	50,70
$\nu$ (mm <sup>2</sup> /s)	20,0	47,82	227,82	48,18	105,13
	22,5	43,69	203,14	43,58	95,03
	25,0	40,04	181,86	39,75	86,14

Cabe lembrar ainda que não é possível preparar duas soluções exatamente iguais, por isso, para cada solução de fluido, as três propriedades são medidas novamente, nas

temperaturas indicadas na Tabela 2.4. Os fluidos 1, 2 e 4 contêm apenas água e PEG, com as concentrações de 33,9%, 51,6% e 42,8% de PEG, respectivamente, enquanto o fluido 3 possui 35% de água, 35% de álcool e 30% de PEG, todos em base mássica. Pode-se perceber que a adição de 35% de álcool reduz a tensão superficial em quase a metade (de 51 para 28 mN/m), enquanto a viscosidade dessa mistura corresponde à viscosidade de uma solução com 33,82% de PEG, se não fosse adicionado álcool, logo pode-se concluir que o álcool, quando substitui um percentual da água, contribui para tornar a solução mais viscosa.

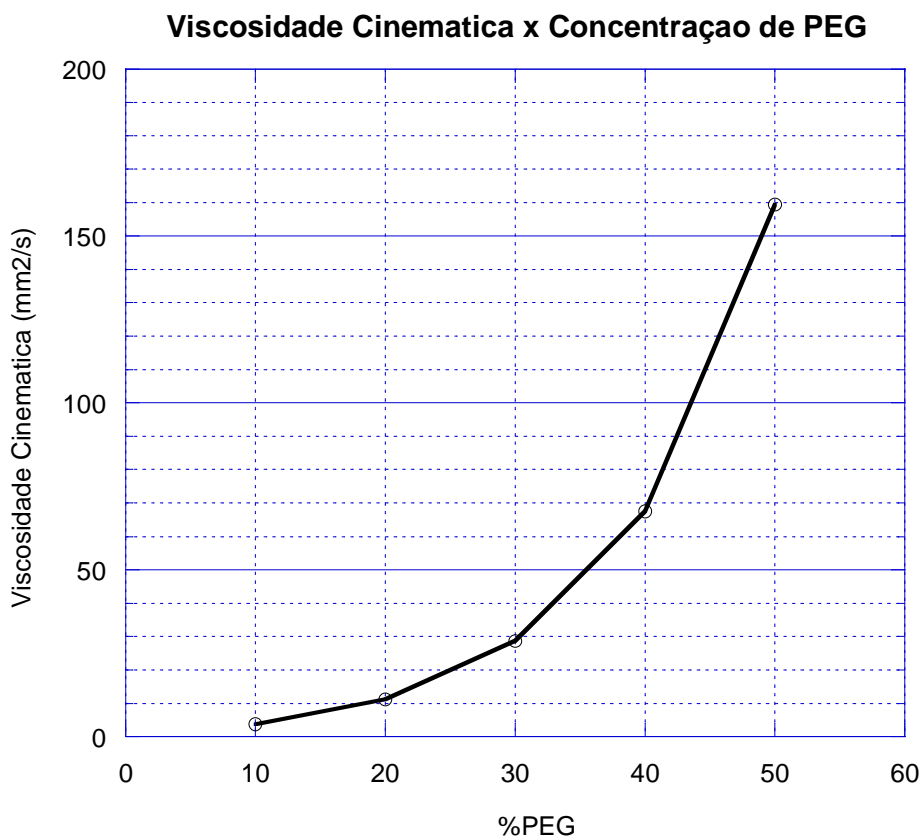
Na solução contendo somente água e PEG, para se encontrar a relação entre a viscosidade cinemática e a concentração desse polímero, são feitas cinco amostras, com as medidas tomadas a 25°C, conforme Tabela 2.5.

**Tabela 2.5.** Relação entre a concentração de PEG e a viscosidade cinemática.

%PEG	$\nu$ (mm <sup>2</sup> /s)
10	3,8227
20	11,2833
30	28,7187
40	67,5478
50	159,4618

A viscosidade cinemática aumenta com a concentração de PEG de forma não linear, a curva possui uma pequena inclinação no início e maior declividade à medida que aumenta a concentração, como mostra a Figura 2.8. Veja que de 10% para 20% de PEG, a viscosidade aumenta de 4 para 11 cSt (um aumento de apenas 7 cSt), aproximadamente, enquanto no outro extremo da curva, quando a concentração aumenta de 40 para 50%, a viscosidade aumenta de 67 para 159 cSt (um acréscimo de 92 cSt). Como não são percebidas variações significativas da massa específica e da tensão superficial em função da concentração de

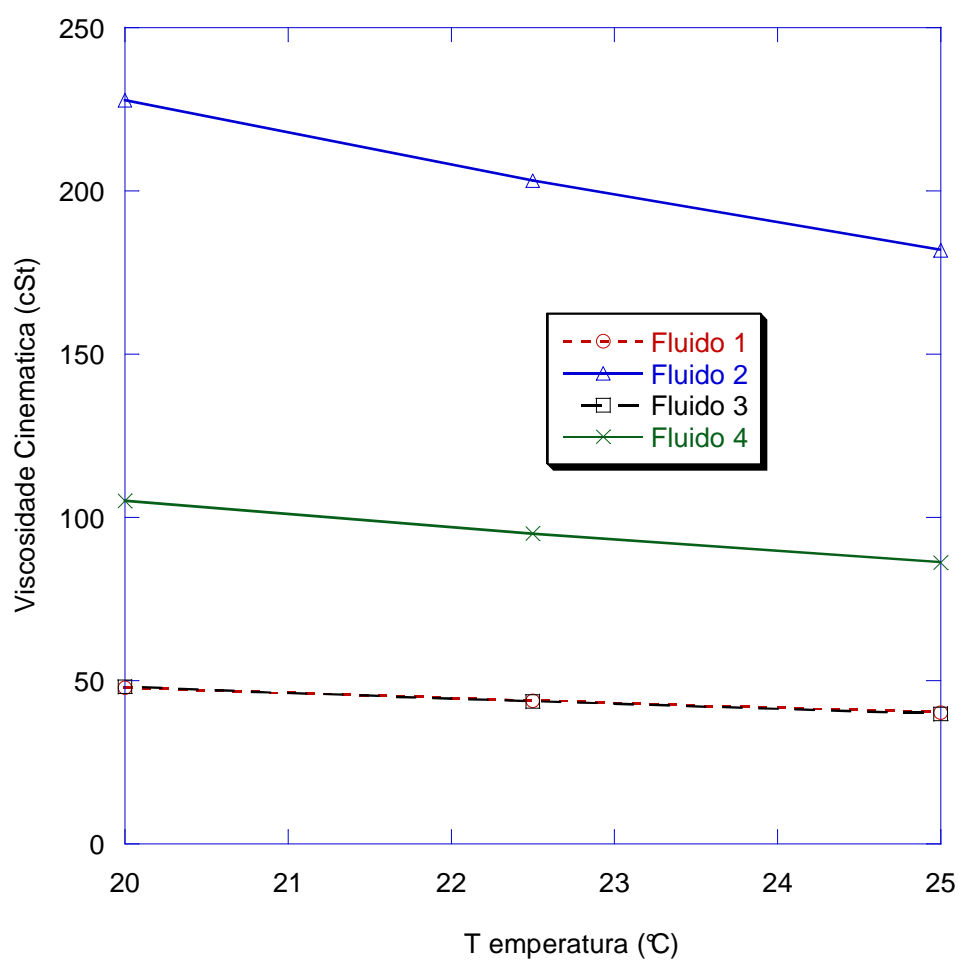
PEG, para as soluções usadas nos experimentos, não são medidas estas propriedades das soluções nas temperaturas mostradas na Tabela 2.5.



**Figura 2.8:** Viscosidade cinemática em função da concentração de PEG, medido a 25°C.

A viscosidade da solução aumenta muito com a queda de temperatura, para as concentrações maiores (viscosidade alta), e possui uma variação menos significativa para concentrações menores, como mostra a Tabela 2.4 e gráfico da Figura 2.9. Para o fluido mais viscoso, Fluido 2 da Tabela 2.4, nota-se que a viscosidade varia consideravelmente com a temperatura, de 228 cSt (a 20°C) para 182 cSt (a 25°C), uma variação de -20,2%, porém a massa específica e a tensão superficial quase não são alteradas, dentro da faixa em questão, variando -0,03% e -2,3%, respectivamente.

No gráfico da Figura 2.9, as curvas dos fluidos 1 e 3 são coincidentes, propositalmente essas soluções são feitas com concentrações buscando alcançar as mesmas viscosidade, porém com tensões superficiais diferentes.



**Figura 2.9:** Viscosidade cinemática em função da temperatura.

**Tabela 2.6.** Propriedades dos fluidos a 25°C.

	%PEG	%Água	%Álcool	$\nu$ (mm <sup>2</sup> /s)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma$ (mN/m)
<b>Fluido 1</b>	33,9	66,1	0	40,04	1062,3	54,271
<b>Fluido 2</b>	51,6	48,4	0	181,86	1091,8	50,33
<b>Fluido 3</b>	30,0	35,0	35,0	39,75	978,9	28,32
<b>Fluido 4</b>	42,8	57,2	0	86,14	1070,7	50,70

As propriedades mostradas na Tabela 2.6 são medidas a 25°C, entretanto medições de viscosidade são feitas também a 20°C e a 22,5°C, enquanto medições da massa específica e da tensão superficial são feitas apenas em duas temperaturas, 20 e 25°C. Somente a viscosidade cinemática ( $\nu$ ) é mostrada nos gráficos das Figuras 2.8 e 2.9 por apresentar variações mais significativas que as outras duas grandezas.

Para a medição da viscosidade cinemática da solução de PEG são utilizados viscosímetros de escoamento por capilar, do tipo *Cannon-Fenske*. Nesse medidor, que consiste de um tubo fino de vidro no formato em “U”, o líquido é deixado escoar por gravidade, mede-se o tempo para o fluido percorrer um comprimento definido. O resultado da multiplicação desse tempo (em segundos) por uma constante própria do viscosímetro é a viscosidade cinemática, dada em centi-Stoke (cSt), ou mm<sup>2</sup>/s. Cada viscosímetro possui uma constante, que cobre uma faixa de viscosidades, logo, a escolha do aparelho a ser usado é feita de acordo com a viscosidade do líquido. O tempo da medição deve ficar acima de 50 segundos, para se ter boa precisão. Um tempo mais longo resulta em maior precisão, porém

torna a tarefa muito demorada, o usual é trocar de viscosímetro se o processo se estender além de 10 minutos (600 s).

Para o controle da temperatura de medição da viscosidade é utilizado um banho termostático com uma grande massa de água. Esse aparelho possui resistências elétricas e um sistema de refrigeração, e um microcontrolador que liga e desliga esses sistemas mantendo a temperatura da água dentro de uma faixa muito precisa, com variação menor que 0,01°C.

O viscosímetro com o líquido a ser medido é inserido no banho termostático e aguarda-se por cerca de 10 minutos, para que a amostra entre em equilíbrio térmico com o banho. A medição consiste então em elevar o líquido pelo tubo capilar com um sugador manual, depois solta-se o líquido e deixa-o descer por gravidade, ligando o cronômetro quando passa por uma marca superior e desligando-o quando atinge uma marca inferior. O procedimento é repetido por três vezes, e o valor adotado é a média aritmética das três medições.

Para medir a massa específica é utilizado um sistema de medição por empuxo, que resulta em maior precisão que a balança, não pelos erros deste último, mas sim por aqueles associados à medição do volume. O aparelho utilizado é o mesmo que se mede a tensão superficial. Um bastão padronizado é montado no lugar do anel usado para medir a tensão superficial, esse bastão é descido por um sistema motorizado, com velocidade extremamente lenta, até que fica completamente mergulhado no líquido. Ao estacionar, mede-se a força aplicada ao bastão, e chega-se à massa específica do líquido pela correlação  $\rho = F / V_{\text{BASTÃO}} g$ , onde  $\rho$  é a massa específica do líquido (amostra),  $F$  é a força medida no aparelho,  $V_{\text{bastão}}$  é o volume do bastão e  $g$  é a aceleração da gravidade. Ao pendurar o



bastão no sistema motorizado, é feito a tara, de tal forma que a força  $F$  está subtraída do peso do bastão.

A medição dessa grandeza é feita no tensiômetro da marca *Thermo Scientific*, equipamento totalmente automatizado e com controle preciso de temperatura. Um anel é inserido no líquido pelo sistema motorizado, pela força aplicada ao sistema, o aparelho fornece o valor da tensão superficial entre o ar e o líquido. Este aparelho está ligado a um banho termostático através de duas mangueiras, por onde a água circula continuamente durante a medição, com o objetivo de manter a temperatura em uma faixa bem estreita. A amostra do líquido a ser medido é colocada em um pequeno becker, que fica em um banho-maria, e este está em contato com a água em circulação que vem do banho termostático. A amostra é deixada cerca de cinco minutos para que entre em equilíbrio térmico com o banho.

A força medida no aparelho é fornecida com resolução de 0,0001 gf (grama-força), devido à sensibilidade, a amostra fica em um ambiente fechado por pequenas janelas de vidros localizadas no aparelho, para evitar fluxo de ar no anel de medição, que possa movimentá-lo. Durante as medições evita-se também vibrações ou ruídos nas proximidades, conforme recomendação do fabricante. Pode-se ressaltar ainda que tomadas essas precauções, não é constatado diferenças nas medidas realizadas em horário diurno e noturno.

O PEG é comercializado por empresas específicas de produtos químicos, é adquirido em sacos de 20 kg, vem no estado sólido, no formato de pequenos de lamelas. Tanto o PEG quanto a água são medidos na balança e depois misturados em um Becker, e a solução é colocada em um misturador magnético por cerca de meia hora, para que todo o PEG sólido se dissolva e a solução fique bem homogênea. Após essa etapa, o líquido era armazenado em frascos de plásticos, bem vedado, para evitar evaporação dos componentes. Uma amostra era então retirada para a medição das três propriedades: massa específica, tensão

superficial e viscosidade cinemática. Com a solução contendo álcool o procedimento era o mesmo.

Para o líquido contido em um mesmo frasco vedado, são medidas as propriedades após uma semana e também após 30 dias, para verificar se haveria alteração nas propriedades do fluido, porém é constatado, que não houve qualquer mudança, com as propriedades medidas na mesma temperatura. A balança utilizada nas medições da massa de PEG, água, álcool e a solução possui resolução de 0,01 g, sua medida máxima é de 2200 g, e mínima de 0,5 g.

## 2.4 Determinação da Porosidade

A porosidade é definida como a razão entre o volume dos poros e o volume total do meio poroso, conforme Equação (2.1).

$$\phi = \frac{V_{POROS}}{V_{MEIO.POROSO}} \quad (2.1)$$

O volume dos poros é determinado relacionando a massa de líquido contida no leito ( $m_{inicial}$ ) e a massa específica do líquido:

$$V_{POROS} = \frac{m_{inicial}}{\rho} \quad (2.2)$$

A medida da massa inicial de líquido no meio poroso é obtida conforme descrito no item 2.5. Para este cálculo considera-se que o leito está saturado pelo líquido. Por se tratar de um meio composto por esferas, supõe-se que os poros estão todos interconectados, de tal forma que  $\phi$  representa tanto a porosidade absoluta como a efetiva. O volume total do meio poroso usado na Equação (2.3) é determinado da seguinte forma:

$$V_{MEIO,POROSO} = \frac{\pi(D)^2}{4} L \quad (2.3)$$

Onde D é o diâmetro interno e L o comprimento do cilindro que forma o meio poroso (nesse estudo D = 44,6 mm e L = 261,8 mm e  $V_{meio} = 409\text{cm}^3$ ).

## 2.5 Determinação da Vazão de Líquido e da Massa Perdida

A vazão mássica de líquido é obtida simplesmente dividindo a massa recuperada pelo tempo de passagem  $t$ . Não há um medidor de vazão no sistema, por isso o fluxo não pode ser escolhido com um valor preciso antes do experimento, e seu valor só é conhecido no final. Escolhe-se uma faixa de fluxo através do ajuste da válvula de regulação V2, sabendo que a pressão à montante do meio poroso é constante e igual a 0,5 bar (manométrica). A massa recuperada é obtida pela diferença entre a massa do Becker antes e a massa do Becker depois do experimento. A vazão volumétrica  $Q$  é determinada da seguinte forma:

$$Q = \frac{m_{recup} / \rho}{t} \quad (2.4)$$

Onde  $\rho$  é a massa específica do líquido,  $t$  é o tempo do experimento (tempo de passagem) e  $m_{recup}$  é a massa recuperada.

Após a determinação da massa recuperada, é preciso saber o valor da massa contida inicialmente no meio poroso para calcular a massa perdida. Obtém-se o valor da massa colocada no sistema medindo-se a massa do frasco antes e a massa do frasco depois de encher o leito com líquido, ou seja,  $m_{coloc} = m_{frasc,ant} - m_{frasc,dep}$ . O excesso de líquido é retirado passando pela mangueira inferior e sendo recolhido no Becker, até que alcance o nível das esferas. Neste momento é medida a massa do Becker (com líquido), e subtraindo-se esse valor, e a massa de líquido na mangueira, da massa colocada no sistema, obtém-se

a massa de líquido contida no meio poroso ( $m_{inicial}$ ). Lembrando que a massa do Becker vazio também é medida. O volume da mangueira é de 28,85 cm<sup>3</sup>, conhecendo-se a massa específica do líquido, determina-se a massa contida dentro da mangueira. A massa contida inicialmente no leito é calculada como:  $m_{inicial} = m_{coloc} - m_{liq,mang} - m_{liq,becker}$ . A massa perdida então é calculada como:  $m_{perd} = m_{inicial} - m_{recup}$ . A fração de massa perdida  $m$  pode ser calculada como a massa perdida dividida pela massa inicial do meio poroso, ou seja:

$$m = \frac{m_{perd}}{m_{inicial}} = \frac{m_{inicial} - m_{recup}}{m_{inicial}} = 1 - \frac{m_{recup}}{m_{inicial}} \quad (2.5)$$

As vazões de líquido medidas nos experimentos variam desde 0,05 g/s a 6,40 g/s.

## 2.6 Determinação da Velocidade Média da Massa Recuperada, da Velocidade da Interface Gás-Líquido e do Número de Capilaridade.

A velocidade média do escoamento em um tubo é simplesmente calculada como a razão entre a vazão volumétrica e a área da seção reta, porém, no meio poroso torna-se mais difícil determinar a velocidade porque não há uma área bem definida para o fluxo. No leito poroso as áreas de escoamento são muito irregulares, como mostra a Figura 2.10, o fluido passa por gargantas e espaços maiores constantemente, sofrendo acelerações e desacelerações com frequência. Na literatura usa-se comumente nessa geometria a velocidade de Darcy, que é a vazão dividida pela área frontal do leito (que inclui tanto os canais quanto a parte sólida). Com o objetivo de fazer um paralelo com o tubo capilar, no presente trabalho usa-se um outro conceito, baseado no princípio de que o meio poroso é constituído por um feixe de capilares, e a velocidade média da massa recuperada (ou velocidade média do escoamento) é calculada com a fórmula:

$$\bar{u} = \frac{Q}{\phi A} \quad (2.6)$$

onde  $Q$  é vazão volumétrica calculada pela Equação (2.4),  $A$  é a área frontal do meio poroso (área do tubo de acrílico) e  $\phi$  é a porosidade. A vazão volumétrica  $Q$  pode ser facilmente determinada dividindo a massa recuperada pelo tempo de passagem e pela massa específica do líquido:

$$Q = \frac{(m_{rec}/t)}{\rho} \quad (2.7)$$

Para o cálculo do número de capilaridade usa-se a velocidade média global de avanço do gás,  $U$ , também chamada velocidade da interface gás-líquido. Encontra-se esta velocidade comparando o fluxo no meio poroso com o sistema de um gás empurrando um líquido em um tubo capilar, como mostra a Figura 2.10. A partir do conhecimento de  $\bar{u}$ , esta velocidade é determinada pelo princípio da conservação da massa no capilar, achando-se uma relação entre essas duas velocidades e as áreas de seção reta do tubo  $A_{sr, capilar}$  e da bolha  $A_{sr, bolha}$ :

$$\dot{m} = \rho \bar{u} A_{sr, capilar} = \rho U A_{sr, bolha} \quad \frac{\bar{u}}{U} = \frac{A_{sr, bolha}}{A_{sr, capilar}} \quad (2.8)$$

Numa análise geométrica do sistema mostrado na Figura 2.10 conclui-se que a fração de massa perdida  $m$  relaciona-se com as áreas de escoamento da seguinte forma:

$$m = \frac{A_{sr, capilar} - A_{sr, bolha}}{A_{sr, capilar}} = 1 - \frac{A_{sr, bolha}}{A_{sr, capilar}} \quad (2.9)$$

Substituindo a Equação (2.8) na Equação (2.9) obtêm-se a relação entre a velocidade da interface gás-líquido  $U$ , a velocidade média do escoamento  $\bar{u}$  e a fração de massa perdida:

$$m = 1 - \frac{\bar{u}}{U} \quad U = \frac{\bar{u}}{(1-m)} \quad (2.10)$$

Conforme Taylor [2], o parâmetro adimensional denominado número de capilaridade (ou simplesmente capilaridade)  $Ca$  é a razão entre as forças viscosas e forças devidas à tensão superficial, ele definido como:

$$Ca = \frac{U\mu}{\sigma} \quad (2.11)$$

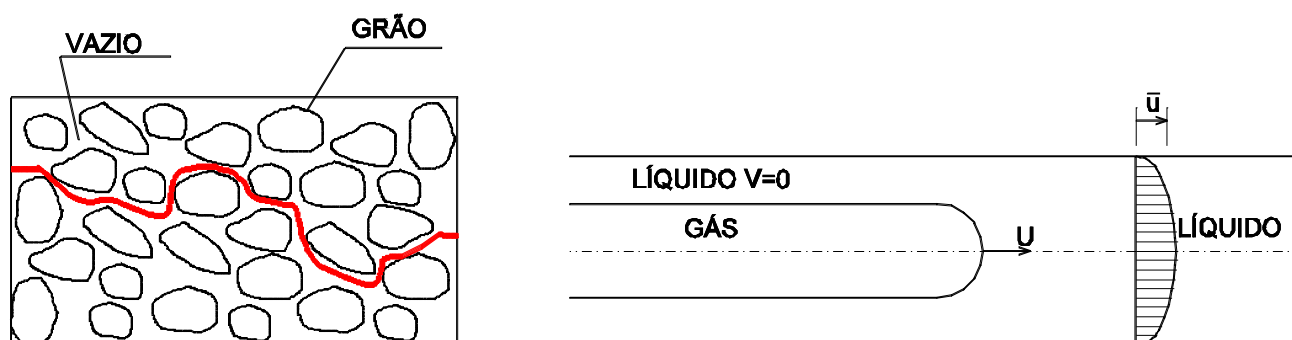
Onde  $U$  é a velocidade da interface gás-líquido calculada na Equação (2.10). App & Mohanty [6] definem o número de capilaridade de forma generalizada no escoamento tridimensional como  $Ca = k\nabla P / \sigma$ , onde  $k$  é a permeabilidade absoluta no meio poroso. Fazendo  $\nabla P = \Delta P / L$  no escoamento unidimensional e lembrando que a permeabilidade absoluta é  $k = U\mu L / \Delta P$ , e substituindo a última equação na anterior, chega-se à mesma forma definida por Taylor [2].

O número de Reynolds  $Re$  é definido como:

$$Re = \frac{Ud_H}{\nu} \quad (2.12)$$

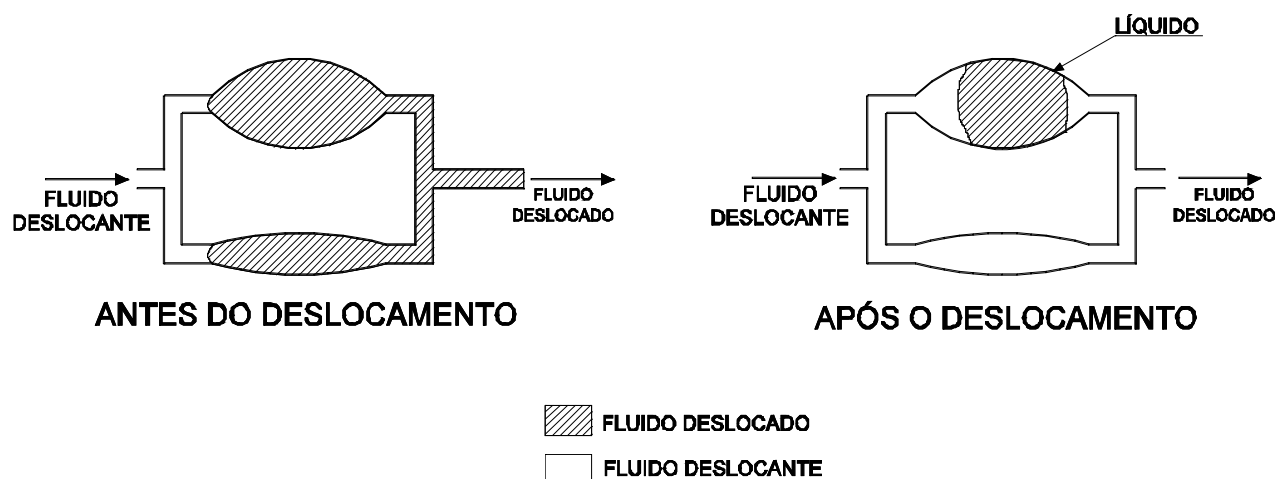
Onde  $d_H$  é o diâmetro hidráulico,  $U$  é a velocidade da interface gás líquido e  $\nu$  é a viscosidade cinemática. O diâmetro hidráulico é definido em função da porosidade e do diâmetro médio da esfera que compõe o meio poroso:

$$d_H = \frac{\phi d_p}{(1 - \phi)} \quad (2.13)$$

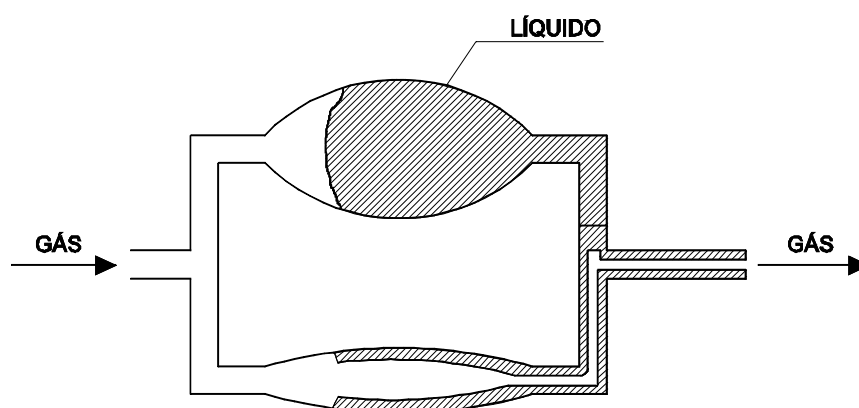


**Figura 2.10:** (a) Fluxo em um canal capilar no meio poroso. (b) Gás empurrando líquido em um tubo capilar.

O movimento de fluidos em meios porosos tem certa similaridade com o fluxo em tubos capilares, devido ao fato do leito poroso ser idealizado por um feixe de tubos capilares paralelos, já que os espaços entre os grãos são tão pequenos que as forças capilares são significativas. Entretanto algumas diferenças podem ser observadas. O processo específico de recuperação de um líquido muito viscoso por injeção de gás em um tubo capilar está representado na Figura 2.10, o fluxo de forma geral em um meio poroso é mostrado também na mesma figura, um fluido deslocando outro fluido em um meio poroso é esquematizado na Figura 2.11. O esquema mostrado nesta última figura representa dois fluidos com viscosidades relativamente próximas. Quando um gás desloca um líquido viscoso no meio poroso, há superposição dos processos representados nas Figuras 2.10 e 2.11, de tal forma que este processo é mais bem representado na Figura 2.12, ou seja, parte do líquido fica retida na parede do canal menor, como ocorre no tubo capilar, e outra parte preenche completamente um canal paralelo e este pode ficar bloqueado pelo fluido deslocado.



**Figura 2.11:** Esquema idealizado mostrando como as forças capilares agem quando um fluido desloca outro em um meio poroso, e como o fluido deslocado fica aprisionado. Adaptado de Herbeck et al [12].



**Figura 2.12.** Líquido viscoso retido no meio poroso após a passagem de um gás.

A velocidade média da massa recuperada,  $\bar{u}$ , medida nos experimentos varia desde  $8,0 \times 10^{-5}$  m/s até  $1,0 \times 10^{-2}$  m/s. Já a velocidade média global de avanço do gás,  $U$ , cobre um intervalo de  $1,2 \times 10^{-4}$  m/s até  $6,2 \times 10^{-2}$  m/s

## 2.7 Informações Experimentais Complementares



São descritas aqui as atividades feitas para a realização de cada experimento sobre o deslocamento de líquido do meio poroso por injeção de gás. O primeiro passo é regular/verificar a pressão do ar na válvula localizada na mangueira de entrada do meio poroso para 0,5 bar manométrica, esse valor é mantido independente das condições à montante da válvula, pois a pressão na saída do compressor opera até 8 bar. A pressão de 0,5 bar é suficiente para vencer as perdas de carga em todas as situações, a vazão é regulada em uma outra válvula, localizada à montante do meio poroso. Em seguida coloca-se as esferas no tubo de acrílico vertical até a altura de 261,8 mm, deixando-se um espaço na parte superior do tubo sem ser preenchido com esferas. Em uma balança de precisão é feita a medição da massa do frasco de líquido antes do preenchimento, depois é medida a massa do Becker vazio. O meio poroso e a mangueira a jusante do meio são preenchidos com o líquido verificando-se a inexistência de bolha de ar. Esta verificação é feita fazendo-se escoar um pouco de líquido no sistema e observando a mangueira e o tubo de acrílico, que são transparentes. O tubo é preenchido até quase no topo (acima do nível das esferas), deixando um pouco do líquido cair no Becker. A quantidade de massa colocada no meio poroso é dada pela diferença entre a massa do frasco antes e depois do preenchimento. Mede-se a temperatura do ar próximo ao meio poroso e a temperatura do líquido dentro do meio poroso. Neste momento a tampa superior do tubo de acrílico é colocada, juntamente com o anel de vedação e também os parafusos de aperto da tampa. É aberta a válvula à montante do meio poroso, pressurizando o sistema, mantendo as válvulas à jusante do meio poroso fechadas. Neste instante a válvula de bloqueio à jusante do meio poroso é aberta, enquanto a válvula de regulação (válvula globo) próxima a ela é mantida fechada. Em seguida vamos abrindo e fechando a válvula globo até ajustar a vazão de líquido desejada. Após este ajuste mantém-se todas as válvulas abertas enquanto o líquido escoar pelo tubo de acrílico até atingir o nível das esferas, quando então a válvula de bloqueio é fechada. Nesse

momento é medida a massa do Becker contendo líquido que saiu do sistema, antes do início da contagem do tempo.

As atividades descritas até então são preliminares, o principal ocorre a partir desse instante, quando de fato o gás empurra o líquido através do meio poroso. A válvula de bloqueio à jusante do meio poroso é aberta, simultaneamente com a ligação do cronômetro, dando início ao escoamento do líquido. O ar começa então a empurrar o líquido através do meio poroso, se o escoamento for lento a frente de gás é visível uniformemente pela seção transversal do tubo de acrílico, no entanto, para velocidades maiores observa-se várias frentes de ar, em alturas diferentes, ou seja, por alguns caminhos o ar avança rapidamente, enquanto em outros quase não há movimento, criando-se canais de passagem de ar e canais obstruídos por líquido. O fluxo prossegue até que a primeira bolha de ar atinge a mangueira transparente na saída do meio poroso, nesse instante a válvula de bloqueio é fechada e simultaneamente parado o cronômetro. O tempo registrado no cronômetro é chamado de tempo de passagem.

Para obtenção dos dados necessários para o cálculo da fração de massa perdida em função do número de capilaridade, algumas tarefas são feitas ainda após o fluxo. Mede-se a massa do Becker contendo o líquido retirado do meio poroso, além de um pouco de líquido retirado antes da contagem do tempo. A diferença entre essa medida e a massa do Becker antes do experimento fornece a massa de líquido recuperada do meio poroso, a vazão de líquido é calculada como essa massa recuperada dividida pelo tempo de passagem. Em seguida a válvula de bloqueio é aberta novamente durante um longo tempo (não medido), para recolher o máximo de líquido que for possível, para ajudar na limpeza das esferas. O líquido recolhido no Becker é colocado em um frasco fechado e usado novamente em outros experimentos, porém, suas propriedades são medidas outra vez. Para verificar que não houve alteração significativa da temperatura, nesse instante essa variável é medida no

líquido dentro do Becker. A válvula de ar (na entrada do meio poroso) é fechada, para despressurizar o sistema, depois a válvula de bloqueio na saída do meio poroso é fechada, encerrando o experimento.

Vale ressaltar que na etapa de preenchimento do meio poroso com líquido, quando é utilizado fluido muito viscoso (da ordem de  $\nu = 200 \text{ mm}^2/\text{s}$ ), em um meio com as menores esferas (0,50 a 0,85 mm), o líquido não desce por gravidade, como nos outros casos, sendo necessário o fechamento temporário da tampa superior e a injeção de ar comprimido, para fazer que a solução de PEG entre e o ar seja expulso do meio poroso.

Ao término de cada experimento, várias outras tarefas complementares são realizadas para concluir o trabalho. O líquido contido no Becker, que foi retirado do meio poroso é recolhido em um frasco separado, para ser reutilizado. A tampa superior do tubo de acrílico é desaparafusada e retirada, junto com a mangueira de ar (a tampa inferior nunca é retirada, permanece fixa ao tubo de acrílico). As esferas são retiradas do tubo pela parte superior. O tubo de acrílico e a mangueira a jusante são lavados com água, depois são deixados cheios com este líquido durante pelo menos 30 minutos, para dissolver todo o PEG das paredes. As esferas são lavadas com detergente e água, durante cerca de 60 minutos, para que o detergente retire todo o PEG, e depois a água retire todo o detergente. A lavagem das esferas é feita cuidadosamente, para garantir restos de detergente não fique impregnado nas esferas, pois uma pequena quantidade deste material reduz enormemente a tensão superficial da solução de PEG. Por último as esferas são colocadas para secar em uma estufa de resistências elétricas.

Para secagem das esferas de vidro, elas são aquecidas no forno até cerca de  $120^\circ\text{C}$ , e deixadas por horas neste aparelho, até que toda a água seja vaporizada. Antes de iniciar cada experimento, o ar do mesmo compressor usado no experimento é soprado no tubo de

acrílico vazio durante alguns minutos, para secá-lo completamente, as esferas só são colocadas após esse processo.

## Capítulo 3

# Resultados

São apresentados e discutidos aqui os resultados obtidos nos experimentos descritos no capítulo 2. Os gráficos mostram a fração de massa perdida  $m$  em função do número de capilaridade  $Ca$  e do diâmetro médio das esferas que formam o meio poroso. É discutida também a influência de outros parâmetros, como o número de Reynolds e a tensão superficial. É importante salientar que os resultados apresentados usam a velocidade média da interface gás-líquido,  $U$ , determinada partir da velocidade média da massa recuperada,  $\bar{u}$ , como mostrado no Capítulo 2, para calcular o número de capilaridade, conforme definido por Taylor [2], e não a velocidade de Darcy, utilizada na maioria dos problemas envolvendo meios porosos.

Em todos os casos, a fração de massa perdida é baixa para pequenos números de capilaridade, aumentando rapidamente até  $Ca \approx 0,01$ . Após este ponto a massa perdida aproxima-se de um patamar constante. Entretanto, em alguns casos observa-se a influência de outros parâmetros quando  $Ca > 0,01$ . Para todos os fluidos observa-se que a fração de massa perdida  $m$  começa entre 30% e 47% quando o número de capilaridade  $Ca$  é próximo de  $3 \times 10^{-4}$ , mas  $m$  cresce rapidamente com o aumento de  $Ca$ , atingindo valores de 80% a 90% com  $Ca \approx 3 \times 10^{-2}$ . Uma observação importante é que, quando comparado com resultados de estudos em tubos capilares, a faixa do número de capilaridade  $Ca$  analisada no presente trabalho é bem mais estreita, indo em geral até  $Ca = 0,06$  e num caso específico

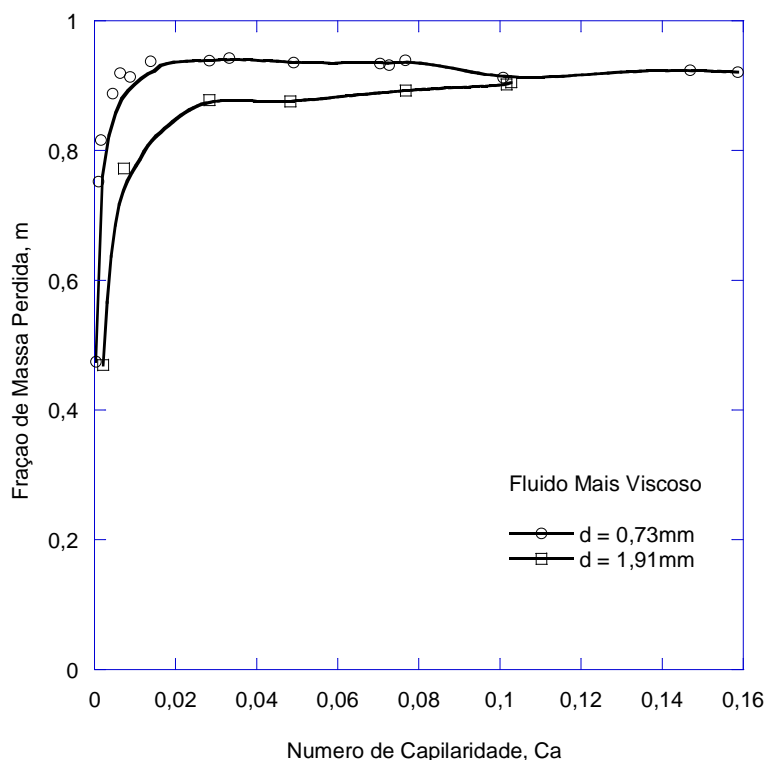
até  $Ca = 0,16$ , enquanto nos tubos capilares descritos nos trabalhos de referência chega-se a  $Ca = 10$ . O fator limitante para se estender a faixa do número de capilaridade nesse estudo é a medição do tempo de passagem, que resulta em valores menores que 5 segundos para a região à direita da curva mostrada nos gráficos, gerando imprecisão nos resultados.

### 3.1 Efeitos do Número de Capilaridade e do Tamanho Médio dos Grãos

Todos os gráficos apresentados neste capítulo analisam a fração de massa perdida  $m$  em função do número de capilaridade  $Ca$ , porém, neste item verifica-se também a influência do tamanho dos grãos. O número de Reynolds é mantido menor que 0,10 no meio com  $\bar{d} = 0,73$  mm e menor que 0,17 no meio com  $\bar{d} = 1,91$ , para evitar efeitos de inércia, e a tensão superficial é aproximadamente constante nesses experimentos. É utilizado o fluido mais viscoso ( $\nu = 200$  cSt).

Como mostra a Figura 3.1, a fração de massa perdida é de 46% para os dois meios quando  $Ca$  é muito baixa (início da curva), então, a massa perdida aumenta rapidamente com a capilaridade (uma inclinação quase vertical), quando esta se aproxima de uma reta horizontal, em torno de  $Ca = 0,02$ . A partir desse ponto, não variando mais com o número de capilaridade. O gráfico da Figura 3.1 mostra que a massa perdida é maior para o meio com  $\bar{d} = 0,73$  mm (meio poroso com granulometria mais fina) do que para o meio com  $\bar{d} = 1,91$  mm (meio poroso com granulometria mais grossa). Para  $Ca = 0,04$ , a fração de massa perdida quase estabiliza em 95% para o meio  $\bar{d} = 0,73$  mm, enquanto para o meio com  $\bar{d} = 1,91$  mm ela quase estabiliza no valor  $m = 87\%$ . Mais à frente no gráfico,  $m$  tem uma leve

queda para 92% no meio com  $\bar{d} = 0,73$  mm, a partir de  $Ca = 0,08$ , enquanto  $m$  sobe para 90% no meio com  $\bar{d} = 1,91$  mm. No meio com  $\bar{d} = 0,73$  mm,  $m$  continua aproximadamente estabilizada com o número de capilaridade, porém no meio  $\bar{d} = 1,91$  mm não é possível medir o valor de  $m$  quando  $Ca$  ultrapassa 0,1.



**Figura 3.1:** Efeito do número de capilaridade e do tamanho médio do grão na fração de massa perdida. Fluido mais viscoso ( $\nu = 200$  cSt e  $\sigma = 52$  mN/m). Variando o meio poroso:  $\bar{d} = 0,73$  mm e  $\bar{d} = 1,91$  mm.

Comparando os resultados mostrados na Figura 3.1 com os trabalhos experimentais de Taylor [2] e de Cox [3] para tubo capilar, observa-se o mesmo comportamento qualitativo, ou seja, inclinação acentuada da curva para baixos valores do número de capilaridade e tendência a um patamar constante para valores altos de capilaridade. Já em uma análise quantitativa, a massa perdida no meio poroso é significativamente maior que no tubo capilar

e a assintotização da curva ocorre para valores bem menores do número de capilaridade quando comparado aos tubos capilares. No estudo de Taylor [2] a assintotização ocorre para  $Ca$  em torno de 2 (com  $m = 0,56$ ), enquanto no meio poroso a assintotização ocorre com  $Ca$  em torno de 0,2 (com  $m$  próximo de 0,90).

Confrontando com o trabalho experimental em meio poroso de Xavier [7], observa-se boa concordância, ressaltando que os meios porosos dos dois estudos são quase os mesmos. Porém a curva do fluido mais viscoso assintotiza um pouco acima da curva do trabalho de Xavier [7] (este usa um fluido menos viscoso), sugerindo que este último ainda está sujeito aos efeitos de inércia (ver Ítem 3.2). Quando comparado com os resultados de fluido newtoniano do estudo numérico de Sousa et al [14] em tubo capilar, verifica-se que em escala logarítmica o formato da curva é muito semelhante, com a diferença que para os meios porosos a faixa do número de capilaridade é mais estreita e a fração de massa perdida é maior.

Os resultados aqui mostrados concordam qualitativamente com o estudo de Jamaloei et al [11], que concluem também que a massa perdida aumenta com o aumento da velocidade (vazão) do fluido injetado, a fração volumétrica de óleo retido no meio poroso aumenta de 0,442 para 0,485 quando a vazão injetada aumenta de  $3,33 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{s}$  ( $v_{\text{med}} = 5,25 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ) para  $10 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{s}$  ( $v_{\text{med}} = 15,60 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ). As vazões nos dois trabalhos têm ordens de grandeza diferentes (a menor vazão usada no presente trabalho é de  $0,05 \text{ cm}^3/\text{s}$ ), porque em seu estudo, Jamaloei et al trabalham com micromodelo. Para que a comparação seja mais significativa é fornecido aqui o número de capilaridade de Jamaloei et al, calculado conforme o presente trabalho,  $Ca = \mu U/\sigma$ , resultando em  $Ca = 0,00486$  e  $Ca = 0,0144$ , para as duas vazões descritas acima, respectivamente. As comparações podem ser feitas apenas qualitativamente, devido aos seguintes aspectos: (1) meios com tamanhos de grãos (ou



gargantas) diferentes; (2) tensão superficial não é da mesma ordem de grandeza; (3) fluxo trifásico vs bifásico; (3) gás vs líquido como fluido deslocante.

O meio poroso com menor tamanho de grão possui também poros de dimensões reduzidas, o que oferece maior resistência ao deslocamento do fluido contido em seu interior, causando assim menor recuperação e menor eficiência de varredura.

O aumento das forças viscosas em relação às forças de tensão superficial resulta em mais massa retida na parede porque a primeira está ligada à resistência ao movimento do fluido, e a segunda diz quanto o líquido molha o grão do leito poroso. Porém esse efeito é sensível até quando as forças viscosas representam cerca de um centésimo das forças de tensão superficial, a partir daí qualquer condição adicional de desequilíbrio entre essas forças não modifica a massa recuperada.

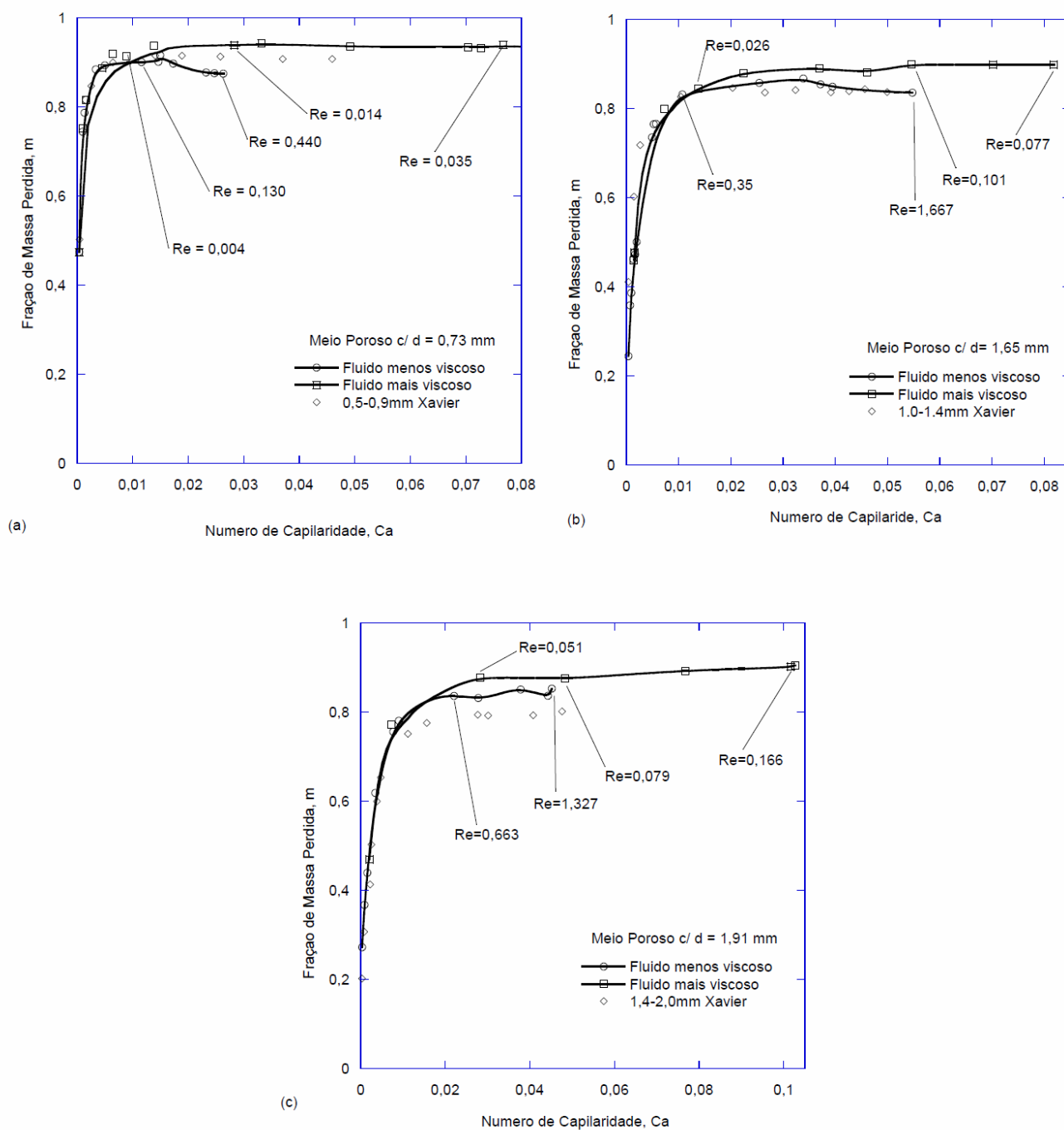
### 3.2 Efeitos de Inércia

Ao trabalhar com fluido menos viscoso ( $\nu = 40$  cSt), e mesma tensão superficial que o caso anterior, verificou-se os mesmos resultados para a região de baixo número de capilaridade, porém a assintotização da curva ocorre para valores um pouco menores da fração de massa perdida, nos três meios porosos avaliados, quando comparados com o fluido mais viscoso, conforme Figura 3.2.

O comportamento qualitativo das curvas é o mesmo, alterando apenas os valores, sendo que neste caso, em geral, houve maior recuperação de líquido do que quando se usa o fluido mais viscoso. No meio com  $\bar{d} = 0,73$  mm, o valor de  $m$  inicia-se com 47%, enquanto o meio poroso com  $\bar{d} = 1,91$  mm começa com a fração de massa perdida de 26%. O meio com  $\bar{d} = 0,73$  mm tende a estabilizar para  $m = 90\%$  (5% menos do que quando não estão

presentes os efeitos de inércia) a partir de  $Ca = 0,05$ , e o meio com  $\bar{d} = 1,91$  mm tende a estabilizar para o valor de  $m = 85\%$  (cerca de 2% menos que o caso mostrado na Figura 3.1), a partir da capilaridade  $Ca = 0,02$ .

Semelhante ao caso anterior, a curva referente ao meio com  $\bar{d} = 1,91$  mm apresenta uma pequena queda da massa perdida a partir de  $Ca = 0,015$ , caindo de  $m = 90\%$  para 87%. A curva do meio com  $\bar{d} = 0,73$  mm encerra em  $Ca = 0,027$ , porque valores superiores do número de capilaridade, para este fluido e para este meio poroso, necessitaria de medição de tempos menores que 5 segundos, aumentando a imprecisão nos resultados.



**Figura 3.2:** Efeitos de inércia. (a) Meio poroso com  $\bar{d} = 0,73$  mm). (b) Meio poroso com  $\bar{d} = 1,65$  mm). (c) Meio poroso com  $\bar{d} = 1,91$  mm). Variando o Fluido. Comparação com Xavier [7].

O presente trabalho é comparado com os resultados de Xavier [7] e verifica-se o mesmo comportamento qualitativo, com boa concordância entre os dois estudos. Os resultados não coincidem exatamente devido às imprecisões dos experimentos e também porque os meios porosos não são iguais.

Um outro fato no efeito de inércia é que o fluido menos viscoso começa com uma fração de massa perdida de 25%, enquanto o fluido mais viscoso inicia com 46%, porém devemos frisar que o valor de  $Ca$  é menor para o primeiro fluido, confirmando a informação de que as curvas praticamente coincidentes para  $Ca < 0,01$ . Esse resultado se deve ao fato que é mais difícil conseguir baixos valores de capilaridade para fluidos mais viscosos. Contrariamente, pode-se observar que a curva referente ao fluido mais viscoso geralmente está plotada para valores maiores de  $Ca$ , pois um fluido com viscosidade mais baixa resulta em  $Ca$  baixo para a mesma velocidade e mesma tensão superficial.

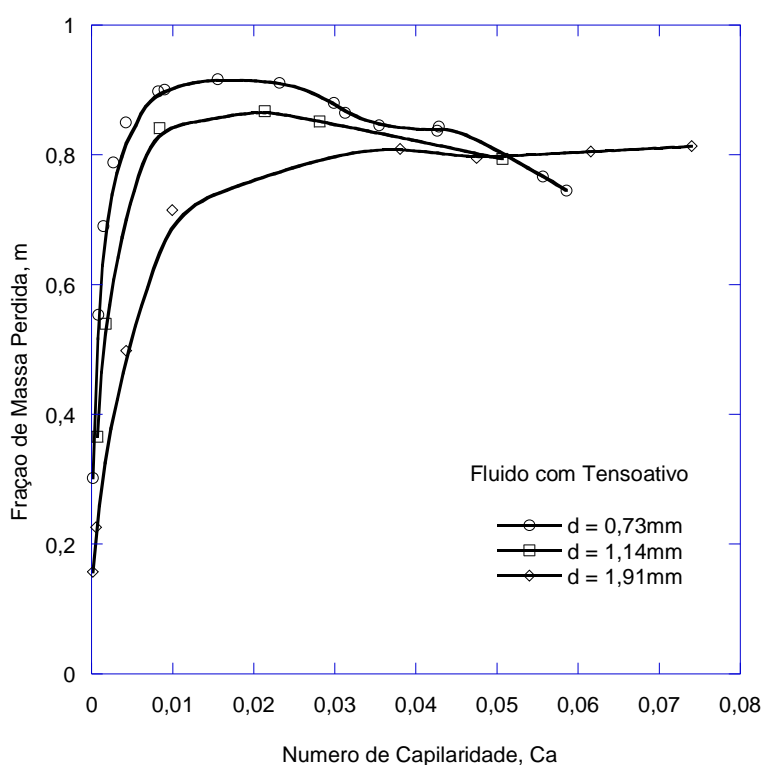
Os resultados aqui encontrados concordam qualitativamente com aqueles descritos por App & Mohanty [6], que relatam que os efeitos de inércia não afetam a permeabilidade do líquido, mas diminuem a permeabilidade do gás em 25%, como o gás escoar com mais dificuldade no meio poroso nestas condições, pode-se concluir que mais líquido será deslocado para fora, aumentando a fração de massa recuperada. Porém não é possível a comparação numérica dos resultados porque esses autores avaliam variáveis diferentes do presente trabalho. Soares et al [19] mostram que a fração de massa perdida  $m$  diminui com o aumento do número de Reynolds  $Re$  quando gás empurra líquido não newtoniano em um tubo capilar, com a queda de  $m$  a partir de  $Re \approx 2$ . No meio poroso do presente trabalho (fluido newtoniano) os efeitos de inércia começam a aparecer para  $Re \approx 0,3$  (mas não começa no mesmo valor para os diferentes meios porosos), essa percepção se dá pela

comparação das curvas dos fluidos mais viscoso e menos viscoso na Figura 3.2. Há dificuldades de se levantar experimentalmente a curva com  $Ca$  constante e variando  $Re$ , já que a velocidade (variável mais fácil de ser alterada) faz parte dos dois parâmetros adimensionais. Manter as condições operacionais variando o diâmetro para alcançar o objetivo descrito acima também é difícil, pois a vazão de ar injetada é medida, mas não controlada em um valor pré-fixado.

A baixos valores do número de Reynolds o deslocamento gás-líquido é dominado por efeitos de capilaridade. Considerando o número de capilaridade constante enquanto o número de Reynolds é acrescido, inércia aumenta ao mesmo tempo que forças de tensão superficial e de viscosidade permanecem constantes. Isto resulta em acréscimo da resistência inercial para o líquido a ser arrastado dentro do filme, que explica o comportamento observado na Figura 3.2.

### 3.3 Efeitos de Parâmetros Dimensionais (Tensão Superficial)

Aqui são discutidos os resultados dos experimentos feitos com um líquido com viscosidade igual ao caso anterior ( $\nu = 40$  cSt), porém com cerca da metade da tensão superficial ( $\sigma = 28$  mN/m). Confirma-se a hipótese de que o meio poroso com partículas maiores resulta em maior recuperação de líquido, porém não para todos os valores do número de capilaridade. Nota-se surpreendentemente na Figura 3.3 que a partir de  $Ca = 0,05$ , no meio poroso com granulometria mais fina ( $\bar{d} = 0,73$  mm) consegue-se extrair mais líquido do que o meio com granulometria mais grossa ( $\bar{d} = 1,91$  mm). Diante deste fato, são realizados experimentos com um meio poroso intermediário, com esferas de diâmetro médio  $\bar{d} = 1,14$  mm, e notou-se a mesma tendência de comportamento.



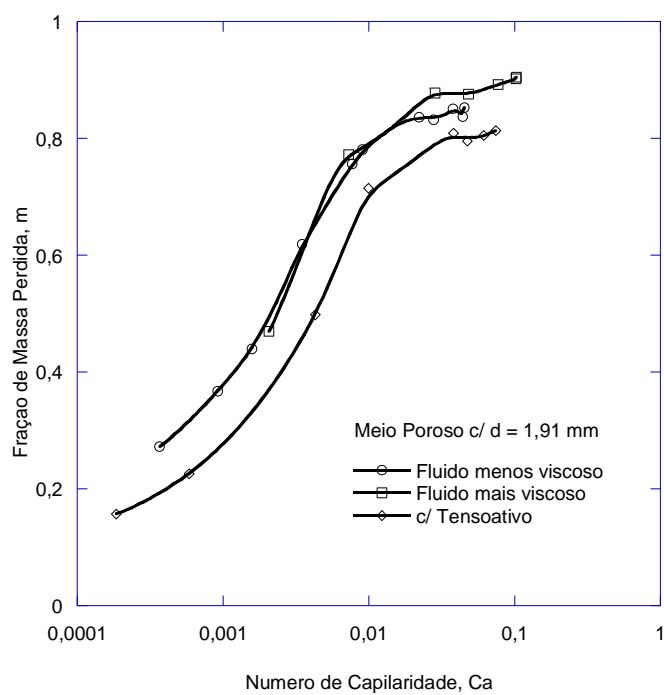
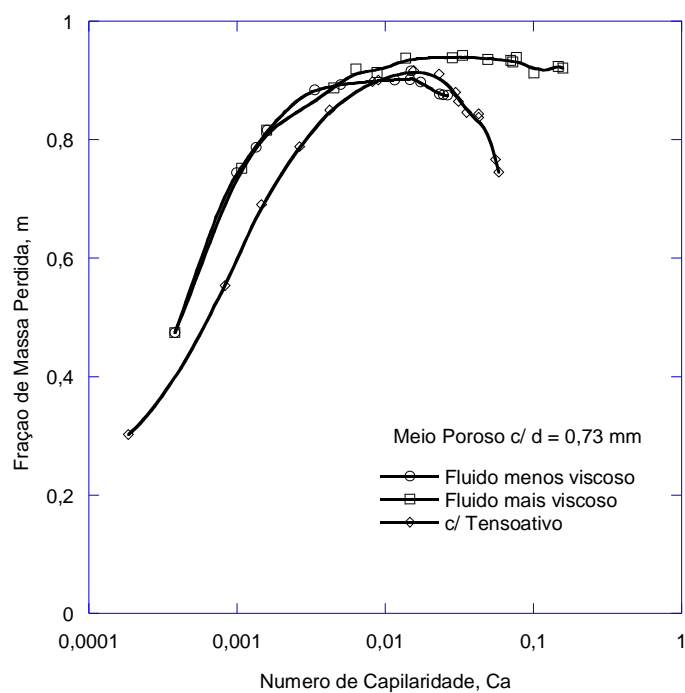
**Figura 3.3:** Efeito da tensão superficial e do tamanho médio do grão. Fluido com tensoativo ( $\nu = 40$  cSt e  $\sigma = 28$  mN/m). Variando o meio poroso:  $\bar{d} = 0,73$  mm,  $\bar{d} = 1,14$  mm e  $\bar{d} = 1,91$  mm.

Comparando com Fergui et al [4], vê-se que esses autores mostram em seu trabalho que a fração de massa recuperada aumenta com a concentração de surfactante, apesar do presente trabalho avaliar outras variáveis, pode-se notar a concordância qualitativa com este fenômeno na Figura 3.4, onde a fração de massa perdida é de 10 a 15% menor para o fluido com tensoativo em relação ao fluido sem esse aditivo, considerando-se o mesmo número de capilaridade. O fluido com menor tensão superficial apresenta um comportamento um tanto diferente na região de maior número de capilaridade no meio de menor granulometria ( $\bar{d} = 0,73$  mm). Após a fração de massa perdida atingir um máximo, ela decresce, com inclinação bem mais suave do que a região de subida, e para um número de capilaridade maior que 0,05, esse meio passa a ter um maior fator de recuperação que o meio de granulometria

mais grossa, conforme mostra a Figura 3.3. Esse fenômeno é devido à pressão capilar, que aumenta com a redução do raio de um capilar. Conforme mostrado por Herbeck et al [12], em dois canais paralelos no meio poroso, um pode reter o fluido deslocado e outro não, e a pressão capilar se instala nas duas faces da gota retida.

Quanto ao fato do meio poroso de menor granulometria resultar em maior recuperação de líquido do que o meio de maior granulometria, para alguns valores de  $Ca$ , pode-se fazer uma comparação qualitativa com os resultados de Jamaloei et al [11]. Em seu trabalho de injeção de polímero com baixa tensão interfacial para deslocar óleo, mostram que o fator de recuperação do óleo aumenta com a diminuição do diâmetro do poro, esses autores usam meios porosos com partículas menores que o presente trabalho, e a tensão interfacial entre o fluido deslocante e deslocado é muito pequena (0,011 mN/m), o que acentua o efeito da melhoria da massa recuperada com gargantas menores.

A Figura 3.3 mostra que a curva  $m$  vs  $Ca$  para o fluido com baixa tensão superficial apresenta um desvio das curvas dos outros dois fluidos, em dois meios porosos, mesmo na região de baixos números de capilaridade ( $Ca < 0,01$ ), onde poderia se esperar que todos os fluidos tivessem o mesmo comportamento. Porém, a fração de massa perdida para esse líquido é cerca de 15% menor que os outros dois fluidos. Pode-se observar também que, enquanto o fluido mais viscoso mantém um mesmo fator de recuperação para capilaridades maiores que 0,01, os outros dois líquidos mostram uma pequena queda na fração de massa perdida quando a  $Ca$  aumenta. Neste gráfico, podemos ver que a fração de massa perdida não é função apenas da capilaridade, como concluído por Xavier [7], nem mesmo na região de  $Ca < 0,01$ , mas é influenciada também pela inércia e pela tensão superficial.



**Figura 3.4:** Resumo de todos os efeitos ( $Ca$ , tamanho do grão, inércia e tensão superficial) em escala logarítmica, com melhor visualização da região de baixa capilaridade.



Na Figura 3.4, pode-se observar, com rara exceção, que  $m$  é menor para o fluido com baixa tensão superficial do que para os outros fluidos.

Também para este fluido os experimentos são feitos até um valor de capilaridade máxima, em que o tempo medido no ensaio é da ordem de 6 segundos.

No anexo A são mostradas as tabelas com os resultados dos experimentos dos quais são gerados os gráficos acima. Nestas tabelas são apresentados os valores do número de capilaridade  $Ca$ , fração de massa perdida  $m$ , número de Reynolds, viscosidade cinemática, tensão superficial e massa específica.

## Capítulo 4

# Comentários Finais

Conforme resultados apresentados no capítulo anterior, podemos concluir que a recuperação de líquido em meios porosos por injeção de gás tem um comportamento um pouco diferente do observado em tubos capilares. Existe a similaridade que a massa perdida varia consideravelmente na região de baixa capilaridade, começando com valores baixos e subindo rapidamente, e depois com tendência a estabilizar nos valores de alta capilaridade (exceto para o fluido com tensoativo). Porém, nos meios porosos, a inclinação da curva é muito maior, ou seja, alcança valores próximos da região assintótica muito mais rápido.

Outro ponto importante é que nos meios porosos, o fluido com tensão superficial baixa apresenta maior fator de recuperação em relação aos outros fluidos, o que não é observado nos tubos capilares, ou seja, o número de capilaridade não é o único parâmetro adimensional que governa o problema na região de  $Ca < 0,01$ . Conforme observado nos três primeiros gráficos do capítulo 3, existe uma influência significativa dos diâmetros das esferas na recuperação do líquido. Vemos que, de maneira geral, quanto maior o tamanho das esferas menor é a massa perdida, sendo exceção a esse fato os extremos das curvas, ou seja, para valores de capilaridade muito baixos, o fator de recuperação tende a ser igual para todos os meios porosos, e para valores altos do número de capilaridade ocorre uma inversão da curva no meio de menor diâmetro com o meio de maior diâmetro quando usado o fluido com

tensoativo. No extremo da curva no lado direito, ocorrem casos diferentes para os diferentes fluidos. Para o fluido mais viscoso, a fração de massa perdida dos dois meios porosos se iguala quando  $Ca = 0,1$ . Para o fluido menos viscoso, os valores de  $m$  não se igualam, mas parece haver uma aproximação dos resultados dos dois meios porosos. Finalmente, para o fluido com baixa tensão superficial, a fração de massa perdida do meio de maior granulometria ultrapassa a fração de massa perdida do meio de menor granulometria. Ao testar um meio poroso intermediário ( $\bar{d} = 1,14$  mm), há uma confirmação deste fenômeno, pois os valores de  $m$  tocam na curva do outros dois meios.

Apesar de existir na literatura uma vasta quantidade de publicações sobre esse assunto, pode-se concluir que cada estudo tem aplicações muito específicas, ou seja, a partir do estudo em um meio poroso, é difícil prever quantitativamente quando altera o leito poroso, os fluidos, as vazões, etc. Pode-se afirmar que o processo da injeção de um fluido para deslocar outro fluido (ou fluidos) no meio poroso é extremamente complexo, dependente de uma quantidade enorme de parâmetros, de tal forma que até mesmo comparar um estudo com outro é difícil, pois a quantidade de fatores que influenciam pode ser muito grande, como tamanho e forma das partículas que compõem o leito, escoamento bifásico ou multifásico, fluxo de gás ou de líquido, líquido newtoniano ou não newtoniano, tensão superficial (ou interfacial), efeitos de inércia, efeitos gravitacionais, vazão, entre outros.

Como estudos futuros sobre esse assunto, sugere-se a montagem de um sistema que possa medir a massa perdida para valores de capilaridade acima de 0,06, exceto para o fluido muito viscoso, que já está apresentado nesse trabalho. Para isso o meio poroso deve ter um comprimento bem maior que 30 cm, assim para uma mesma vazão de gás, a frente de deslocamento levará mais tempo para atravessar o leito, que é o limitante neste estudo.

Sugerimos também o estudo com areia, ao invés de esferas de vidro. Se a areia for bem peneirada, com faixa de diâmetros bem estreita, os resultados podem ser comparados

com aqueles obtidos por esferas, já que em aplicações reais como em um reservatório de petróleo, o leito não é feito por esferas, e sim por partículas de formas irregulares.

O escoamento de fluido em meios porosos é complexo e há muito que se estudar, no assunto específico de recuperação de fluido, pode-se estudar ainda casos de líquido deslocando líquido (newtoniano), fluido newtoniano empurrando um fluido não-newtoniano, e até mesmo um fluido não-newtoniano empurrando outro fluido não-newtoniano. Mesmo para fluidos não-newtoniano, pode-se trabalhar com diversos materiais, usando fluido pseudo-plástico, visco-plástico ou visco-elástico.

Estudos usando modelos matemáticos computacionais de injeção de fluidos para recuperação em meios porosos em casos gerais são pouco desenvolvidos, e é um campo a ser ainda muito explorado. Esses estudos são ainda muito específicos, devido à complexidade do fenômeno do movimento de fluido em meio poroso. Um estudo mais aprimorado envolvendo outros parâmetros adimensionais, além do número de capilaridade e número de Reynolds, poderia ser avaliado, visto que a alteração da viscosidade e da tensão superficial produz resultados diferentes para a curva massa perdida versus número de capilaridade. Podem-se estudar os efeitos da pressão capilar e de inércia nesse fenômeno.

No problema tratado aqui ocorre uma zona morta na parte inferior do meio poroso, um estudo com a tela filtrante montada antes da extremidade do tubo de acrílico pode ser avaliado, evitando-se os efeitos de saída.

# Referências Bibliográficas

- [1] F. Fairbrother and A. E. Stubbs, *J. Chem. Soc.* **1**, (1935) 527.
- [2] G. I. Taylor, *Deposition of a viscous fluid on the wall of a tube*, *J. Fluid Mechanics* **10** (1960), 161-165.
- [3] B. G. Cox, *On driving a viscous fluid out of a tube*, *J. Fluid Mechanics* **14** (1962) 81-96.
- [4] O. Fergui, H. Bertin, and M. Quintard; *Transient aqueous foam flow in porous media: experiments and modeling*. *J. Petroleum Science and Engineering* **20** (1998) 9-29.
- [5] C. A. Grattoni, X. D. Jing, and R. A. Dawe; *Dimensionless groups for three-phase gravity drainage flow in porous media*, *Journal of Petroleum Science* **29** (2001), 53–65.
- [6] J. F. App and K. K. Mohanty, *Gas and condensate relative permeability at near-critical conditions capillary and Reynolds number dependence*, *Journal of Petroleum Science and Engineering* **36** (2002) 111-126.
- [7] M. V. S. Xavier, *Análise experimental do processo de recuperação de líquidos em meios porosos artificiais por injeção de gás*, Dissertação de Mestrado, Ufes (2008).
- [8] C. Zhang, M. Oostrom, T. W. Wietsma, J. W. Grate and M. G. Warner, *Influence of Viscous and Capillary Forces on Immiscible Fluid Displacement: Pore-Scale Experimental Study in a Water-Wet Micromodel Demonstrating Viscous and Capillary Fingering*, *Energy & Fuels* **25** (2011) 3493-3505.
- [9] R. Lenormand, C. Zarcone and A. Sarr, *Mechanisms of the displacement of one fluid by another in a network of capillary ducts*, *J. Fluid Mechanics*, **135** (1983) 337-353.
- [10] M. Algharaib, R. Gharbi and A. Malallah, *Scaling Immiscible Displacements in Porous Media with Horizontal Wells*, *Transport in Porous Media*, **65** (2006) 89-105.

- [11] B. Y. Jamaloei, F. Ahmadloo and R. Kharrat, *The effect of pore throat size and injection flowrate on the determination and sensitivity of different capillary number values at high-capillary-number flow in porous media*, *Fluid Dynamics Research*, **42** (2010) 055505 (30pp).
- [12] E. F. Herbeck, R. C. Heintz, and J. R. Hastings, *Fundamentals of Tertiary Oil Recovery*, Pet. Engineer (1976).
- [13] A. J. Poslinsky, P. O. Oehler, and V. K. Stokes, *Isothermal gas assisted displacement of a viscoplastic liquids in tubes*, *Polimer Engeneering ad Science* **35** (1995) 877-892.
- [14] D. A. Sousa, E. J. Soares, R. S. Queiroz, and R. L. Thompson, *Numerical investigation on gás-displacement of a shear-thinning liquid and a visco-plastic material in capillary tubes*, *J. Non-Newtonian Fluid Mech*, **144** (2007), 149-159.
- [15] E. J. Soares, M. S. Carvalho, and P. R. Souza Mendes, *Gás displacement of non-newtonian fluids in a tube*, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (2001), 11-16.
- [16] E. J. Soares, M. S. Carvalho, and P. R. Souza Mendes, *Gas-displacement of non-newtonian liquids in capillary tubes*, *I. J. Heat and Fluid Flow* **27** (2006) 95-104.
- [17] S. Cobos, M. S. Carvalho, V. Alvarado, *Flow of oil–water emulsions through a constricted capillary*, *Int. Journal of Multiphase Flow* **35** (2009) 507-515.
- [18] R. L. Thompson, E. J. Soares, R. D. A. Bacchi, *Further remarks on numerical investigation on gas displacement of a shear-thinning liquid and a visco-plastic material in capillary tubes*, *J. Non-Newtonian Fluid Mechanics* **165** (2010) 448-452.
- [19] E. J. Soares, M. S. Carvalho and P. R. Souza Mendes, *Gás-displacement of non newtonian liquids in capillary tubes*, *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, **27** (2006) 95-104.
- [20] E. J. Soares, R. L. Thompson, *Flow regimes for the immiscible liquid-liquid displacement in capillary tubes with complete wetting of the displacement liquid*, *J. Fluid Mechanics* **641** (2009) pp 63-84.

- [21] W. Zhao, M. A. Ioannidis, *Gas exsolution and flow during supersaturated water injection in porous media*, *Advances in Water Resources* **34** (2011) 2-14.
- [22] J. L. Carvalho, J. H. Curran, *Three-dimensional displacement discontinuity solutions for fluid-saturated porous media*, *Int. J. Solids Structures* **35** (1998) 4887-4893.
- [23] *Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2012*. ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2012).
- [24] A. J. Rosa, R. S. Carvalho, J. A. D. Xavier, *Engenharia de Reservatórios de Petróleo*, **1ª** Edição, Editora Interciência (2006).
- [25] J. E. Thomas et al, *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*, **2ª** Edição, Editora Interciência (2001).

# ANEXO



## Anexo A. Resultados dos Experimentos na Forma de Tabela.

Nas tabelas a seguir,  $Ca$  é o número de capilaridade,  $m$  é a fração de massa perdida,  $Re$  é o número de Reynolds,  $\nu$  é a viscosidade cinemática,  $\sigma$  é a tensão superficial e  $\rho$  é a massa específica.

**Tabela A.1.** Meio poroso com  $\bar{d} = 0,73$  mm e fluido menos viscoso.

<b>Ca</b>	<b>m</b>	<b>Re</b>	<b><math>\nu</math></b> <b>(mm<sup>2</sup>/s)</b>	<b><math>\sigma</math></b> <b>(mN/m)</b>	<b><math>\rho</math></b> <b>(kg/m<sup>3</sup>)</b>
0,00038	0,4747	<b>0,0072</b>	32,47	53,81	1048,0
0,00099	0,7443	<b>0,0172</b>	34,91	53,80	1053,2
0,00134	0,7872	<b>0,0238</b>	35,26	53,80	1053,8
0,00160	0,8160	<b>0,0300</b>	34,45	53,80	1052,4
0,00336	0,8845	<b>0,0655</b>	33,16	53,80	1050,1
0,00500	0,8934	<b>0,1108</b>	30,80	53,82	1043,1
0,01161	0,9009	<b>0,1332</b>	45,01	54,27	1050,0
0,01465	0,9013	<b>0,1774</b>	44,02	54,27	1050,0
0,01497	0,9161	<b>0,1852</b>	41,36	54,27	1062,3
0,01733	0,8973	<b>0,1721</b>	46,50	54,27	1062,3
0,02324	0,8774	<b>0,2384</b>	45,74	54,00	1064,9
0,02474	0,8756	<b>0,3051</b>	42,82	54,27	1062,3
0,02633	0,8749	<b>0,4445</b>	35,61	53,79	1054,4

**Tabela A.2.** Meio poroso com  $\bar{d} = 0,73$  mm e fluido com viscosidade intermediária.

Ca	m	Re	v (mm <sup>2</sup> /s)	$\sigma$ (mN/m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
0,00038	0,4747	<b>0,0072</b>	32,47	53,81	1048,0
0,00107	0,7523	<b>0,0026</b>	90,41	50,84	1071,6
0,00158	0,8159	<b>0,0037</b>	92,18	50,90	1072,0
0,00449	0,8875	<b>0,0106</b>	92,18	50,90	1072,0
0,01370	0,9221	<b>0,0317</b>	95,84	51,03	1072,8
0,02357	0,9269	<b>0,0554</b>	95,84	51,03	1072,8
0,02511	0,9292	<b>0,0523</b>	96,24	51,04	1072,8
0,03861	0,9387	<b>0,0831</b>	95,84	51,03	1072,8
0,04547	0,9250	<b>0,0989</b>	97,45	51,13	1073,4
0,04878	0,9203	<b>0,1208</b>	91,83	50,89	1071,9
0,06162	0,8973	<b>0,1373</b>	95,84	51,03	1072,8
0,06858	0,9119	<b>0,1514</b>	97,45	51,13	1073,4
0,07711	0,9165	<b>0,1690</b>	95,84	51,03	1072,8
0,08190	0,9101	<b>0,1781</b>	97,45	51,13	1073,4

**Tabela A.3.** Meio poroso com  $\bar{d} = 0,73$  mm e fluido mais viscoso.

:Ca	m	Re	v (mm <sup>2</sup> /s)	$\sigma$ (mN/m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
0,00038	0,4747	<b>0,0072</b>	32,47	53,81	1048,0
0,00107	0,7523	<b>0,0026</b>	90,41	50,84	1071,6
0,00158	0,8159	<b>0,0037</b>	92,18	50,90	1072,0
0,00449	0,8875	<b>0,0106</b>	92,18	50,90	1072,0
0,00638	0,9198	<b>0,0047</b>	167,28	52,76	1090,0
0,00884	0,9136	<b>0,0042</b>	201,44	50,88	1091,9
0,01378	0,9378	<b>0,0089</b>	174,20	52,75	1090,3
0,02830	0,9384	<b>0,0143</b>	194,63	50,69	1091,9
0,03325	0,9423	<b>0,0235</b>	169,59	52,76	1090,1
0,04917	0,9355	<b>0,0234</b>	203,14	50,93	1092,0
0,07045	0,9345	<b>0,0487</b>	172,50	52,75	1090,4
0,07272	0,9316	<b>0,0311</b>	210,05	51,09	1092,0
0,07671	0,9393	<b>0,0350</b>	206,10	51,00	1092,0
0,10079	0,9129	<b>0,0434</b>	210,05	51,09	1092,0
0,14690	0,9239	<b>0,0629</b>	210,05	51,09	1092,0
0,15872	0,9208	<b>0,0698</b>	207,09	51,02	1092,0

**Tabela A.4.** Meio poroso com  $\bar{d} = 0,73$  mm e fluido com tensoativo.

Ca	m	Re	v (mm <sup>2</sup> /s)	$\sigma$ (mN/m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
0,00019	0,3021	<b>0,0012</b>	44,32	28,41	980,5
0,00083	0,5538	<b>0,0055</b>	44,13	28,41	980,5
0,00146	0,6906	<b>0,0104</b>	42,36	28,37	979,9
0,00265	0,7880	<b>0,0192</b>	41,28	28,35	979,5
0,00422	0,8502	<b>0,0277</b>	44,87	28,42	980,7
0,00821	0,8978	<b>0,0521</b>	44,87	28,42	980,7
0,00900	0,9008	<b>0,0594</b>	42,36	28,37	979,9
0,01558	0,9169	<b>0,0956</b>	44,69	28,42	980,6
0,02317	0,9115	<b>0,1492</b>	44,50	28,42	980,6
0,02989	0,8800	<b>0,1792</b>	44,87	28,42	980,7
0,03127	0,8651	<b>0,2081</b>	44,13	28,41	980,5
0,03546	0,8458	<b>0,2371</b>	43,28	28,39	980,2
0,04262	0,8376	<b>0,2689</b>	44,69	28,42	980,6
0,04287	0,8436	<b>0,2759</b>	44,32	28,41	980,5
0,05569	0,7668	<b>0,3819</b>	42,51	28,38	979,9
0,05855	0,7456	<b>0,3709</b>	44,13	28,41	980,5

**Tabela A.5.** Meio poroso com  $\bar{d} = 1,65$  mm e fluido menos viscoso.

Ca	m	Re	v (mm <sup>2</sup> /s)	$\sigma$ (mN/m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
0,00039	0,2444	<b>0,0420</b>	19,52	51,26	1044,30
0,00071	0,3585	<b>0,0773</b>	19,52	51,26	1044,3
0,00092	0,3864	<b>0,0276</b>	37,58	46,55	1060,3
0,00134	0,4619	<b>0,0568</b>	34,91	53,80	1053,2
0,00157	0,4777	<b>0,0486</b>	37,24	46,53	1058,6
0,00168	0,4729	<b>0,2108</b>	18,62	54,72	1058,7
0,00196	0,5009	<b>0,0542</b>	39,08	46,57	1062,0
0,00491	0,7354	<b>0,1441</b>	38,34	46,55	1059,8
0,00524	0,7653	<b>0,1571</b>	38,34	46,55	1059,8
0,00567	0,7659	<b>0,1763</b>	36,92	46,53	1058,2
0,01072	0,8320	<b>0,3501</b>	37,09	48,09	1067,6
0,02548	0,8576	<b>0,7899</b>	37,22	46,57	1062,0
0,03388	0,8672	<b>1,0374</b>	37,34	46,55	1060,0
0,03716	0,8545	<b>1,0901</b>	39,37	46,56	1060,9
0,03944	0,8492	<b>1,5032</b>	31,53	48,09	1067,6
0,05475	0,8357	<b>1,6678</b>	38,48	46,55	1060,0

**Tabela A.6.** Meio poroso com  $\bar{d} = 1,65$  mm e fluido mais viscoso.

Ca	m	Re	$\nu$ (mm <sup>2</sup> /s)	$\sigma$ (mN/m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
0,00145	0,4602	<b>0,0066</b>	100,28	51,16	1073,59
0,00152	0,4767	<b>0,0030</b>	154,21	52,77	1089,6
0,00731	0,7991	<b>0,0324</b>	101,89	51,21	1073,89
0,01376	0,8448	<b>0,0256</b>	159,59	52,77	1089,7
0,02243	0,8798	<b>0,0407</b>	162,67	52,76	1089,8
0,03693	0,8899	<b>0,0712</b>	156,52	52,77	1089,6
0,04609	0,8815	<b>0,0485</b>	210,05	51,09	1092,0
0,05455	0,8989	<b>0,1006</b>	161,13	52,76	1089,8
0,07018	0,8986	<b>0,1093</b>	174,20	52,75	1090,3
0,08176	0,8984	<b>0,0771</b>	223,87	51,43	1092,1

**Tabela A.7.** Meio poroso com  $\bar{d} = 1,91$  mm e fluido menos viscoso.

Ca	m	Re	$\nu$ (mm <sup>2</sup> /s)	$\sigma$ (mN/m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
0,00037	0,2723	<b>0,0148</b>	37,01	53,79	1056,7
0,00092	0,3676	<b>0,0389</b>	36,74	53,79	1056,3
0,00157	0,4396	<b>0,0576</b>	39,13	53,78	1060,0
0,00348	0,6188	<b>0,1490</b>	35,73	53,79	1054,6
0,00769	0,7562	<b>0,3134</b>	37,14	53,79	1056,9
0,00905	0,7808	<b>0,2738</b>	43,11	54,27	1062,3
0,02210	0,8365	<b>0,6625</b>	43,26	54,27	1062,3
0,02786	0,8319	<b>1,0762</b>	37,41	53,79	1057,3
0,03784	0,8509	<b>0,9427</b>	46,06	50,95	1065,0
0,04430	0,8368	<b>1,2770</b>	44,52	54,27	1062,3
0,04519	0,8528	<b>1,3272</b>	44,35	54,27	1062,3

**Tabela A.8.** Meio poroso com  $\bar{d} = 1,91$  mm e fluido mais viscoso.

Ca	m	Re	v (mm <sup>2</sup> /s)	$\sigma$ (mN/m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
0,00207	0,4693	<b>0,0042</b>	164,21	52,76	1089,9
0,00729	0,7723	<b>0,0144</b>	174,20	52,75	1090,3
0,02829	0,8778	<b>0,0505</b>	171,13	52,76	1090,2
0,04829	0,8760	<b>0,0792</b>	180,69	52,75	1090,5
0,07676	0,8925	<b>0,1366</b>	171,13	52,76	1090,2
0,10171	0,9021	<b>0,1036</b>	226,83	51,50	1092,1
0,10277	0,9052	<b>0,1661</b>	181,52	52,75	1090,6

**Tabela A.9.** Meio poroso com  $\bar{d} = 1,91$  mm e fluido com tensoativo.

Ca	m	Re	v (mm <sup>2</sup> /s)	$\sigma$ (mN/m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
0,000185	0,1572	<b>0,0034</b>	42,51	28,38	979,9
0,00059	0,2259	<b>0,0111</b>	42,20	28,37	979,8
0,00432	0,4984	<b>0,0616</b>	47,89	28,78	984,81
0,00995	0,7150	<b>0,1662</b>	44,32	28,41	980,5
0,03808	0,8095	<b>0,5439</b>	47,13	28,76	984,50
0,04748	0,7956	<b>0,6920</b>	47,32	28,77	984,58
0,06154	0,8050	<b>0,8750</b>	47,89	28,78	984,81
0,07400	0,8132	<b>1,1470</b>	45,38	28,71	983,74

**Tabela A.10.** Meio poroso com  $\bar{d} = 1,14$  mm e fluido com tensoativo.

Ca	m	Re	v (mm <sup>2</sup> /s)	$\sigma$ (mN/m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
0,00074	0,3653	<b>0,0069</b>	46,37	28,74	984,20
0,00175	0,5395	<b>0,0158</b>	46,37	28,74	984,20
0,00837	0,8409	<b>0,0702</b>	47,70	28,78	984,73
0,02133	0,8676	<b>0,1787</b>	47,70	28,78	984,73
0,02814	0,8514	<b>0,2197</b>	49,03	28,81	985,26
0,05068	0,7936	<b>0,3932</b>	49,03	28,81	985,26