

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

Marcos Versiani Santos Xavier

Análise Experimental do Processo de Recuperação de
Líquidos em Meios Porosos Artificiais por injeção de Gás

VITÓRIA, 28 de novembro, 2008

Marcos Versiani Santos Xavier

**Análise Experimental do Processo de Recuperação de
Líquidos em Meios Porosos Artificiais por injeção de Gás**

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

Orientador: Prof. Dr. Edson José Soares

VITÓRIA, 28 de novembro, 2008

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

X3a Xavier, Marcos Versiani Santos, 1981-
Análise experimental do processo de recuperação de líquidos
em meios porosos artificiais por injeção de gás / Marcos Versiani
Santos Xavier. – 2008.
84 f. : il.

Orientador: Edson José Soares.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito
Santo, Centro Tecnológico.

1. Materiais porosos. 2. Porosidade. 3. Recuperação
secundária do petróleo. 4. Capilaridade. I. Soares, Edson José. II.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III.
Título.

CDU: 621

Análise Experimental do Processo de Recuperação de Líquidos em Meios Porosos Artificiais por injeção de Gás

Marcos Versiani Santos Xavier

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

Prof. Dr. Cherlio Scandian

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Edson José Soares

Prof. Dr. Rogério Ramos

Prof. Dr. Roney Leon Thompson

*”Um Homem não é grande pelo que faz, mas pelo que renuncia”
Albert Schweitzer.*

Dedico à minha querida e maravilhosa Família.

Agradecimentos

Inicio agradecendo a este que é o maior de todos: DEUS. Quem se prostra na presença de meus DEUS beberá da sua fonte e transbordará no espírito. Quem se prostra na presença de meu DEUS se possuirá do Espírito Santo. Dedico os seguintes agradecimentos:

À toda minha família pelo apoio incondicional e amor incessante em mais uma etapa vencida em minha vida. Meu carinho especial a estes que sempre acreditaram em mim: Antônia Versiani, Marcos Xavier, Jacqueline, Janaína e Juliana;

Ao professor Edson José Soares pela brilhante orientação desta dissertação, pelo incentivo e discussões que me auxiliaram neste trabalho com quem pude adquirir profundos conhecimentos inclusive relativos à docência;

Ao professor Rogério Silveira de Queiroz que com imensa boa vontade me cedeu espaço no laboratório de aerossóis e bioescoamentos para montagem da bancada de experimentos, pelo auxílio no projeto da bancada e pela valiosa atenção dispensada;

Ao professor Bruno Venturini da Faculdade Centro Leste (UCL) pelo auxílio e atenção que contribuíram para a conclusão deste trabalho;

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

da Universidade Federal do Espírito Santo (PPGEM-UFES) que de alguma forma contribuíram para a minha formação de Engenheiro Mecânico pesquisador;

À CAPES pelo suporte financeiro;

À todos os funcionários e coordenadores do Departamento de Engenharia Mecânica e em especial à funcionária Maria José (Zezé) pelo sempre prestativo, atencioso e carinhoso atendimento;

Aos amigos que sempre estiveram presentes nesta caminhada, assimilando problemas e compartilhando soluções. Não podendo deixar de citar, em especial, André Soneghet, André Menegaz, Garben Bravim, Graziella, João Paulo Barbosa, Leonardo Araújo e Willy Malacarne. Meus agradecimentos também vão para vocês.

Sumário

Sumário	viii
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiii
Resumo	xiv
Abstract	xv
1 Introdução	16
1.1 Motivação	16
1.2 Caracterização do problema	22
1.3 Estado da Arte	26
2 Procedimento de Caracterização dos Meios Porosos	36
2.1 Determinação dos Diâmetros das Esferas	37
2.2 Determinação da Distribuição em Frequência dos Diâmetros das Esferas .	41
2.3 Método de Determinação da Porosidade	44

3	Procedimento de Caracterização do Fluido de Teste Água-PEG	46
3.1	Método de Medição da Massa Específica	46
3.2	Método de Medição da Viscosidade	47
3.3	Método de Medição da Tensão Superficial	50
3.4	Influência da Temperatura e da concentração de PEG, em massa, na curva da Viscosidade Cinemática do Fluido de Teste	52
4	Procedimento Experimental	55
4.1	Método de Medição da Vazão Volumétrica do Gás Nitrogênio	56
4.2	Método de Medição da Massa Perdida do Fluido de Teste	57
4.3	Método de Medição da Velocidade Média de Recuperação do Fluido de Teste	59
4.4	Método de Obtenção da Velocidade Média Global de Avanço do Gás	60
4.5	Método de Obtenção do Número de Capilaridade	60
4.6	Descrição da Montagem Experimental	61
4.7	Metodologia de Obtenção dos Dados Experimentais	63
5	Resultados	67
6	Comentários Finais	75
	Referências Bibliográficas	79

Lista de Figuras

1.1	Representação esquemática da formação de frentes de gás ("fingers") nas gargantas do Meio Poroso.	17
1.2	Evolução da formação dos "fingers" reais no escoamento dos meios porosos do presente estudo.	18
1.3	Efeito capilar: descontinuidade de pressão na interface Líquido-Ar.	19
1.4	Representação esquemática da montagem experimental.	23
2.1	Recipiente para homogeneização das esferas de vidro.	38
2.2	Cartão com esferas do Meio Poroso (A).	39
2.3	Enumeração das esferas e tabela de resultados do programa NI Vision.	40
2.4	Distribuição em frequência dos diâmetros das esferas para o Meio Poroso (A).	42
2.5	Distribuição em frequência dos diâmetros das esferas para o Meio Poroso (B).	42
2.6	Distribuição em frequência dos diâmetros das esferas para o Meio Poroso (C).	43

3.1	Balança Eletrônica, BEL - engineering, MARK. 0.0001, Faixa: 0-200g.	47
3.2	Viscosímetro utilizado na medição da viscosidade do fluido de teste.	49
3.3	Banho Termostático utilizado para auxiliar na medição da viscosidade do fluido de teste.	49
3.4	Tensiômetro Sigma KSV 702 para medição da tensão superficial do fluido de teste.	51
3.5	Anel utilizado pelo tensiômetro para medição da tensão superficial.	51
3.6	Gráfico da influência da temperatura no decaimento da viscosidade cinemática do fluido para várias concentrações de PEG, em massa.	53
3.7	Gráfico da influência da concentração de PEG, em massa, na curva da viscosidade cinemática para várias temperaturas.	54
4.1	Rotâmetros utilizados na medição da vazão volumétrica do gás nitrogênio.	56
4.2	Representação esquemática do deslocamento de líquidos por gás do interior de meios porosos e de tubos capilares.	59
4.3	Dimensões da montagem experimental.	62
4.4	Foto da montagem experimental.	63
5.1	Influência do número de Capilaridade na curva da massa perdida no Meio Poroso (A).	69
5.2	Influência do número de Capilaridade na curva da massa perdida no Meio Poroso (B).	70
5.3	Influência do número de Capilaridade na curva da massa perdida no Meio Poroso (C).	70

5.4 Comparação das curvas da massa perdida obtidas nos escoamentos dos meios porosos (A), (B) e (C) com a curva obtida por Taylor [20] em tubo capilar. 73

Lista de Tabelas

2.1	Especificação das faixas dos diâmetros das esferas que constituem os meios porosos.	36
2.2	Especificação do diâmetro médio, desvio padrão e fator de circularidade das esferas dos meios porosos.	43
2.3	Especificação da porosidade média e do desvio padrão dos meios porosos.	45

Resumo

O deslocamento de líquidos em meios porosos através da injeção de algum tipo de fluido é uma técnica utilizada em vários processos industriais, como a limpeza de solos contaminados e a recuperação de petróleo em meios porosos. Problemas desta natureza são fortemente dependentes do número de capilaridade, caracterizado pela razão entre as forças viscosas e forças devidas à tensão superficial.

O presente trabalho propõe uma investigação experimental do processo de recuperação de líquidos viscosos em meios porosos artificiais formados por esferas de vidro. Investiga-se a influência do número de capilaridade e do diâmetro médio das esferas que constituem o meio na curva da massa não recuperada. Os principais resultados são apresentados em termos da influência do número de capilaridade na curva da fração de massa de fluido não recuperada durante a passagem do gás pelo meio poroso. Os resultados são comparados com os obtidos por Taylor [20] em seu estudo do processo de recuperação de líquidos viscosos em um tubo capilar. Esta comparação tem como propósito buscar um paralelo capilar do meio poroso e mostrar que o número de capilaridade, quando criteriosamente escolhido, é de fato o parâmetro físico que governa o problema.

Abstract

The liquid displacement in porous media by injection of some kind of fluid is a technique used in several industrial processes like the cleanliness of contaminated soils and enhanced petroleum recovery in porous media. Such kinds of problems are strongly dependent of the capillarity number characterized by the ratio between viscous forces and superficial ones.

The present work proposes an experimental investigation of the process of recovery of viscous liquids in artificial porous media constituted by glass spheres. It is investigated the effect of capillarity number and the mean diameter on fraction of mass, m_p , that is left behind. The main results are presented in terms of the effect of capillarity number during the breakthrough time. The results are compared with that by Taylor [20] in his study of gas-liquid displacement in capillary tube. This comparison is performed to looking for a relationship between the gas-displacement in capillary tube and the oil recovery in a more realistic porous media and to prove that the capillarity number is, in fact, the physical parameter that governs the proposed problem.

Nomenclatura

PEG: Polietileno Glicol.

m_p : massa perdida ou não recuperada do fluido de teste.

m_r : massa recuperada do fluido de teste.

\dot{m} : vazão mássica do fluido de teste recuperado.

u : velocidade média de recuperação do fluido de teste.

Q_f : vazão volumétrica do fluido de teste.

V_L : volume total do fluido de teste adicionado ao meio poroso.

V_T : volume total do cilindro do meio poroso.

D : diâmetro interno do cilindro do meio poroso.

L : comprimento do cilindro do meio poroso.

A : área da seção transversal do cilindro do meio poroso.

U : velocidade média global de avanço do gás Nitrogênio (N_2).

d_c : diâmetro interno do capilar equivalente ao meio poroso.

t : tempo de passagem do gás Nitrogênio pelo meio poroso.

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

Símbolos Gregos

σ : tensão superficial do fluido de teste.

ρ : massa específica do fluido de teste.

ϕ : porosidade do meio poroso.

μ : viscosidade dinâmica do fluido de teste.

ν : viscosidade cinemática do fluido de teste.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

O estudo da recuperação de líquidos em meios porosos é fundamental para o desenvolvimento de processos típicos da indústria. Uma aplicação para este estudo é o processo de extração de petróleo em meios porosos. Os reservatórios de petróleo comumente necessitam de algum tipo de intervenção para a extração do óleo por não possuírem, em geral, energia natural suficiente para produção do óleo após a perfuração do poço. Nestes casos, o conhecimento amplo dos mecanismos físicos que influenciam a recuperação do óleo em meios porosos é fundamental para o desenvolvimento do processo de recuperação e consequente aumento dos percentuais de óleo recuperado.

Um meio poroso é caracterizado pela presença de espaços vazios, mais comumente chamados de poros, interconectados ou não, como mostra a Figura (1.1). Na interligação entre os poros existem caminhos, mais comumente chamados de gargantas.

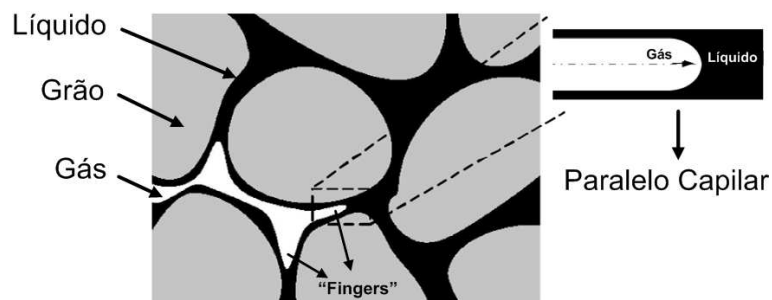


Figura 1.1: Representação esquemática da formação de frentes de gás ("fingers") nas gargantas do Meio Poroso.

As gargantas e os poros quando preenchidos com um fluido qualquer impõe uma resistência de passagem a outro fluido. Esta resistência determina a quantidade de poros que são invadidos pelo fluido deslocante e, conseqüentemente, a eficiência de recuperação do meio. A eficiência de recuperação do meio é o percentual de poros invadidos pela frente de injeção e é quantificada pela varredura do meio.

A varredura está relacionada com a formação de caminhos preferenciais pelas frentes de gás no interior do meio poroso, chamadas na literatura de "fingers". Os caminhos preferenciais são formados por poros interconectados no interior do meio poroso onde o gás encontra menor resistência à sua passagem e por isso mesmo flui preferencialmente através deles. Ao fluir por caminhos de menor resistência, obtém-se menor varredura, menor fração de massa líquida recuperada e, conseqüentemente, menor fator de recuperação. A Figura (1.2) mostra a evolução das frentes reais ("fingers") do gás geradas no escoamento do presente estudo, evidenciando a varredura no meio poroso artificial.

A formação destes caminhos preferenciais está diretamente relacionada com

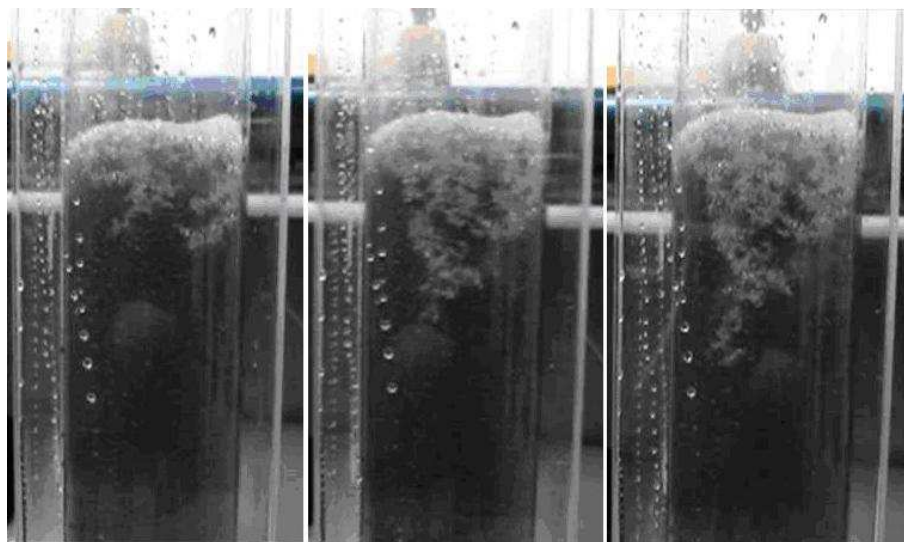


Figura 1.2: Evolução da formação dos "fingers" reais no escoamento dos meios porosos do presente estudo.

a pressão capilar que determina uma descontinuidade de pressão entre as superfícies dos fluidos deslocado e deslocante. Segundo Dullien [5], a pressão capilar na garganta excede o valor de equilíbrio na subsequente porção do poro, desta forma, o deslocamento se dá em um estado de não equilíbrio. Em outras palavras, há uma força líquida finita presente que empurra uma das fases para a saída do poro. A Figura (1.3) ilustra o efeito capilar. O desnível do fluido interno e externamente ao tubo capilar está associado com a descontinuidade de pressão. A tensão superficial é a propriedade física que caracteriza o efeito capilar. Em meios porosos, a redução da tensão superficial permite que o fluido injetado (deslocante) escoe por uma maior quantidade de poros, pois ocorre a redução da pressão capilar, tornando-o mais penetrante aumentando, desta forma, a varredura do meio. O estudo da influência do efeito capilar no escoamento é preponderante para o entendimento do processo de recuperação de óleo em meios porosos e, conseqüentemente, para propor

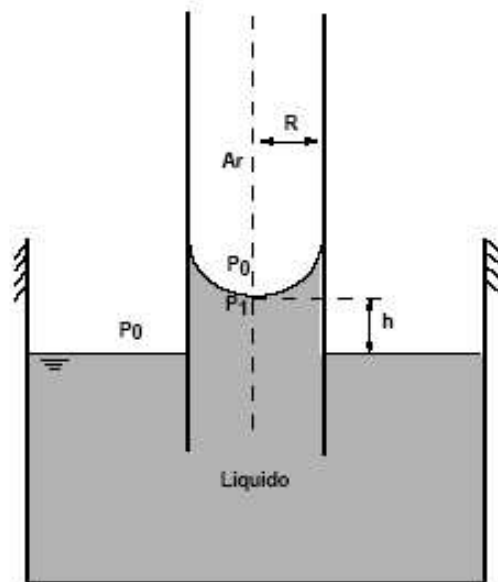


Figura 1.3: Efeito capilar: descontinuidade de pressão na interface Líquido-Ar.

métodos de otimização do fator de recuperação.

O fator de recuperação é a relação entre a quantidade estimada de petróleo contido no reservatório e a quantidade que é efetivamente extraída. Este fator é utilizado para quantificar a produção de um dado reservatório. Estima-se atualmente que o fator médio de recuperação de petróleo em reservatórios esteja aproximadamente entre 20 e 30%. Isto significa dizer que menos de um terço do potencial de volume do petróleo contido no reservatório é extraído. O baixo fator de recuperação dos reservatórios indica a necessidade de pesquisas voltadas ao desenvolvimento de tecnologias para promover incrementos significativos na produção de óleo.

Segundo Johansen [13], os processos de recuperação de petróleo são classificados, tipicamente, em três categorias. A primeira categoria inclui o método de injeção

de líquidos, principalmente água e fluidos tratados quimicamente como microemulsões, surfactantes e polímeros. A segunda categoria inclui todos os métodos de recuperação térmica que introduz calor no reservatório com o objetivo de reduzir a viscosidade do óleo. A injeção de vapor e combustão "in situ" estão nesta categoria. A terceira e última categoria inclui as injeções de gases, miscíveis e imiscíveis, como Dióxido de Carbono (CO_2) e Nitrogênio (N_2). Cada um destes métodos de recuperação são mais apropriados para determinadas peculiaridades tanto do reservatório quanto do óleo armazenado.

A injeção de água é considerada como um método de recuperação de óleo econômico e de larga aplicabilidade, entretanto, é obtido um baixo incremento no fator de recuperação. Uma opção bem mais eficiente é a injeção de microemulsões. As microemulsões são geralmente obtidas pela mistura de álcool, salmoura e, às vezes, óleo. Quando injetadas no reservatório, misturam-se com o óleo a ser recuperado, promovendo significativo ganho de recuperação quando comparado com a injeção de água. Emulsões específicas são manipuladas em função das características das rochas dos reservatórios e das propriedades do óleo armazenado. Desta forma, pode-se obter um mecanismo de recuperação bastante eficiente, caracterizado por um escoamento pistonado com mínimo de perda em miscibilidade. Os "surfactantes", chamados de detergentes, também são largamente utilizados. Quando adicionados ao fluido deslocante reduzem a tensão superficial, aumentando a eficiência de varredura no meio poroso. Como já comentado, a redução da tensão superficial permite maior desobstrução dos poros do meio, aumentando por consequência a quantidade de óleo recuperado. A limitação no uso de surfactantes está associada à sua absorção pela rocha do reservatório que altera a viscosidade do fluido

deslocante e pode diminuir a eficiência de deslocamento.

A Recuperação Térmica é uma técnica aplicada para processos que utilizam calor para auxiliar o movimento do óleo através da formação do reservatório. A viscosidade do óleo é significativamente reduzida quando a sua temperatura é aumentada. O calor é introduzido no meio poroso por três métodos básicos: injeção de fluido quente nas fases líquida, vapor ou gás, injeção de fluido reagente com a formação para adicionar calor "in situ" e, finalmente, a partir de um aquecedor elétrico ou de gás introduzido na formação contendo óleo. A injeção de vapor é altamente aplicada na recuperação de óleos pesados. A combustão "in situ" consiste na injeção de ar dentro do reservatório com o objetivo de estabilizar o caminho do fluxo para a propagação da frente de combustão dos gases, incendiando o óleo cru a partir de um aquecedor de resistência elétrica ou de gás e propagando a frente de combustão por injeção de ar continuada.

A terceira e última categoria de recuperação consiste na injeção de gases imiscíveis e miscíveis. Um gás bastante utilizado é o dióxido de carbono. O dióxido de carbono pode ser dissolvido em água e injetado no reservatório, mas a injeção do gás puro é mais eficiente e dissolve mais completamente em óleo quando em condições de altas pressões dos reservatórios ainda segundo Johansen [13].

O estudo do presente trabalho está associado com a terceira categoria de recuperação de óleo em meios porosos. Trata-se de uma análise experimental do processo de recuperação de massa líquida em meios porosos artificiais a partir da injeção de um gás imiscível. Especificamente, o gás utilizado é o nitrogênio. A partir da medição da massa recuperada em comparação com a massa total adicionada ao meio, obtém-se o

fator de recuperação em função do número de capilaridade do escoamento. O fator de recuperação em um meio poroso real pode variar de acordo com parâmetros relacionados à natureza dos reservatórios, às características do petróleo e à dinâmica do escoamento. No trabalho aqui proposto, os parâmetros analisados são a porosidade e o diâmetro médio das esferas de vidro que constituem o meio poroso.

1.2 Caracterização do problema

O estudo do escoamento em meios porosos é atual, complexo e exige a compreensão do comportamento dos parâmetros que governam o escoamento para que se identifique os fenômenos recorrentes. Em geral, meios porosos são constituídos de poros distribuídos aleatoriamente formando uma matriz, permitindo a passagem de fluido. A Lei de Darcy, segundo Chwang et al [2], representa com relativa fidelidade o escoamento em meios porosos homogêneos, baixa velocidade do fluido (baixo número de Reynolds), fluxos monofásicos e velocidade uniforme. Porém, a maioria dos escoamentos de importância para aplicação industrial são multifásicos e necessitam de correlações estocásticas e aproximações estatísticas para modelar o escoamento neste tipo de meio. O presente trabalho não faz uso de nenhuma dessas correlações e nem mesmo de aproximações estatísticas, pois se trata de uma análise experimental do escoamento bifásico (gás-líquido) da quantidade de massa líquida não recuperada durante o processo de injeção de gás em meios porosos artificiais. A análise é baseada em função do número de capilaridade e da porosidade efetiva (poros interconectados) do meio. A Figura (1.4) mostra a representação esquemática da montagem experimental.

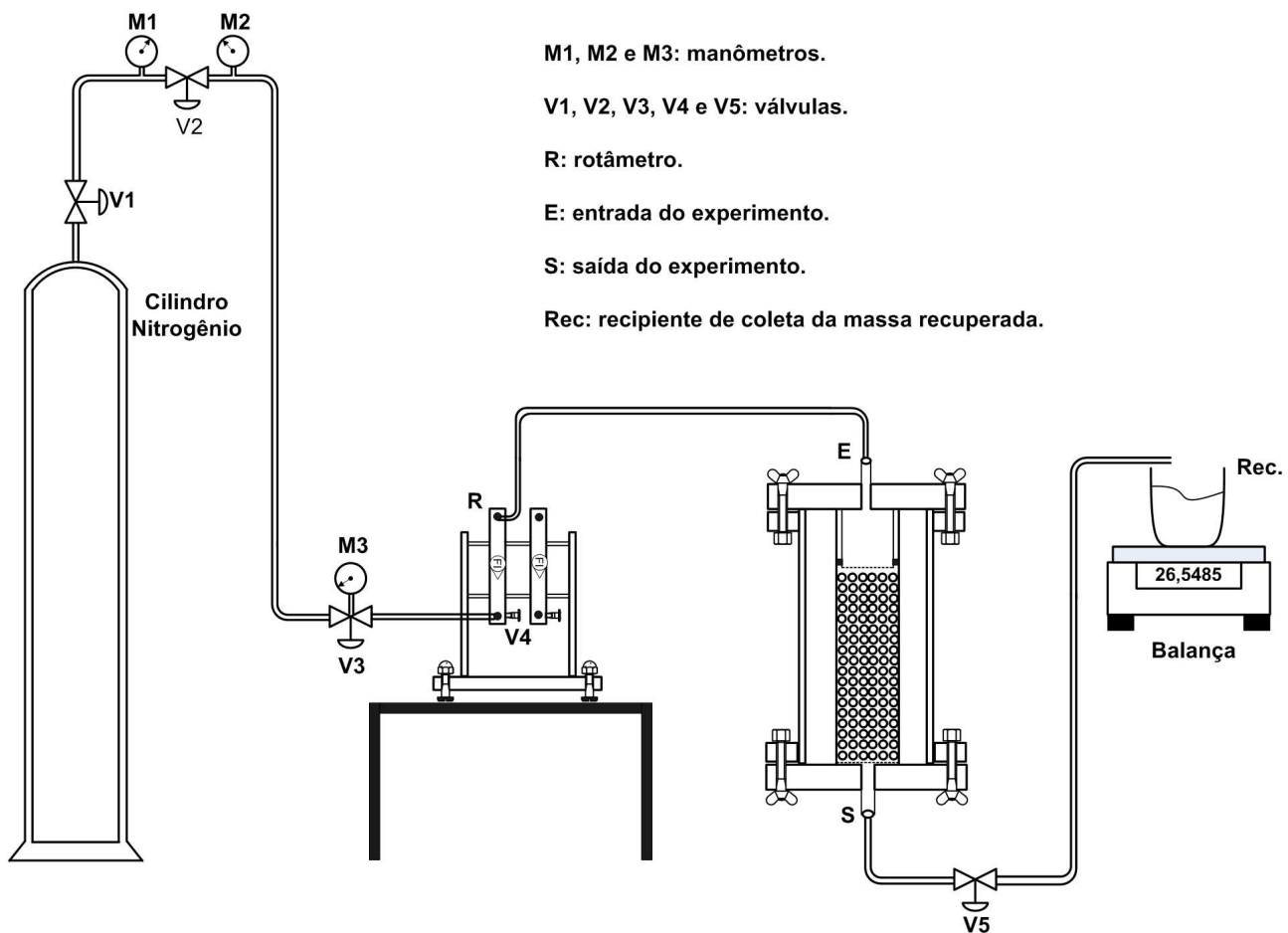


Figura 1.4: Representação esquemática da montagem experimental.

A montagem experimental é constituída por medidores de pressão (manômetros), dispositivos reguladores de fluxo (válvulas), medidor de vazão volumétrica (rotâmetro) e câmara para acomodação do gás nitrogênio.

O meio poroso artificial é composto por um cilindro de acrílico transparente na posição vertical preenchido com esferas de vidro sólidas também transparentes. Esta configuração permite a visualização do deslocamento do líquido pelas frentes de propagação do gás injetado e exclui efeitos indesejados para a análise, como a absorção de líquido pelo meio poroso. O fluido de teste é uma solução de Polietileno Glicol (PEG) em água. Este polímero é utilizado para se obter uma solução com patamar de viscosidade significativamente maior que o da água, reduzindo o número de Reynolds, Re , do escoamento e, conseqüentemente, eliminando os efeitos de inércia. A solução resultante da mistura é um fluido newtoniano e, portanto, nenhum parâmetro reológico, além da viscosidade, μ , é analisado no presente trabalho. O gás inerte utilizado para o deslocamento do líquido é o nitrogênio proveniente de um cilindro acoplado ao experimento por meio de mangueiras e válvulas de controle.

As esferas de vidro que compõem o meio poroso são acomodadas em um cilindro de acrílico que é envolvido por uma célula retangular externa. O espaço entre a célula e o cilindro pode ser preenchido por água ou glicerina para minimizar os efeitos de difração da luz, melhorando as condições de visualização. Na parte superior do cilindro após a entrada (E) há uma câmara para acomodação do gás. Desta forma, o processo de deslocamento do líquido se inicia com o gás uniformemente distribuído ao longo da área da seção transversal do cilindro. Em outras palavras, a frente de propagação do gás tem

início com máxima varredura. Antes da saída (S), na parte inferior do cilindro é colocado um filtro de aço inoxidável circular de diâmetro pouco inferior ao diâmetro interno do cilindro para impedir que as esferas de vidro sejam arrastadas pelo escoamento, prejudicando a ação da válvula esfera (V5). Um filtro idêntico é colocado sobre a extremidade da câmara na entrada (E) do cilindro. A abertura da válvula (V5) é que determina o início do experimento. Com a linha pressurizada, a válvula (V5) é aberta iniciando o deslocamento gás-líquido até que a primeira bolha de gás alcance a saída (S) do cilindro. O tempo necessário para o gás atravessar o meio é chamado tempo de passagem. Na literatura este tempo é comumente chamado de "Breakthrough Time". Todas as análises do presente trabalho são relativas a este tempo de passagem do gás pelo meio poroso.

A disposição dos componentes do experimento é estabelecida com objetivo de minimizar os efeitos de drenagem e arraste das esferas. Em escoamentos ascendentes, quando a força de arraste exercida pelo fluido sobre as partículas é igual ao peso aparente das partículas no leito, estas partículas são erguidas pelo fluido, aumentando a separação das mesmas e o leito se torna fluidizado. No experimento do presente trabalho o meio está consolidado pelos dois filtros, inferior e superior, e o escoamento é descendente o que minimiza o arraste. O efeito de drenagem foi eliminado com a simples disposição do recipiente (Rec) de coleta do fluido recuperado no nível da cota da entrada (E) e o efeito do empuxo é eliminado pela orientação vertical da montagem experimental.

1.3 Estado da Arte

O estudo numérico e experimental do deslocamento de líquidos por injeção de gás em meios porosos tem despertado interesse devido a sua relevância, porém poucos trabalhos estão associados com a análise da influência do número de capilaridade na fração da massa líquida não recuperada do interior do meio poroso, proposta deste trabalho. Além desta proposta, o presente estudo propõe estabelecer um paralelo com o trabalho experimental em tubo capilar realizado por Taylor [20].

Taylor [20] em 1960 estuda o deslocamento de líquidos pela injeção de gás em um tubo capilar. O objetivo do trabalho é quantificar a parcela de massa perdida, m , na parede do tubo durante a passagem do gás. A parcela de massa perdida é calculada como $m = \frac{U - \bar{u}}{U}$, onde U é a velocidade da interface e \bar{u} é a velocidade média do escoamento. O autor apresenta o gráfico da massa perdida em função do número de capilaridade $Ca = \frac{\mu U}{\sigma}$, onde μ é a viscosidade e σ a tensão superficial do fluido recuperado. A análise do gráfico indica que a massa perdida, m , tende para um valor assintótico de aproximadamente 0,60 quando o número de capilaridade, Ca , se aproxima de 2. Os resultados são comparados com a equação empírica proposta por Fairbrother & Stubbs [6] que propõe uma relação direta de m com Ca , $m = (\frac{\mu U}{\sigma})^{1/2}$. Os dados obtidos da massa perdida por esta equação concordam com os resultados de Taylor [20] para uma faixa restrita de capilaridade, $0 < Ca < 0,09$, divergindo a partir de $Ca > 0,09$. O número de capilaridade do deslocamento de líquidos viscosos proposta por Taylor é baseada na velocidade da interface de deslocamento gás-líquido. No presente estudo, a caracterização da capilaridade também é baseada na velocidade da frente de gás do deslocamento. No estudo de Taylor,

a massa perdida é calculada em função das diferenças de velocidades entre as fases deslocante e deslocada, devido a facilidade de se identificar a interface única de deslocamento. No escoamento em meios porosos, várias frentes de deslocamento são formadas. Diferentemente do estudo de Taylor, no presente estudo a massa perdida é medida e através do cálculo da velocidade média da massa recuperada, \bar{u} , obtém-se a velocidade das frentes de gás, U , chamada de velocidade média global de avanço do gás. Desta forma, dá-se início ao paralelo proposto entre os escoamentos, objetivo deste trabalho e que será detalhado nos próximos capítulos.

Cox [3] em 1962 dando prosseguimento ao estudo experimental de Taylor [20] para similar deslocamento de fluidos viscosos conclui que a fração de massa, m , depositada na parede do capilar assintotiza para um valor de aproximadamente 0,60 quando o número de capilaridade tende para 10. O estudo de Cox [3] é adequada quando as forças devidas à tensão superficial são desprezíveis em comparação com as forças viscosas. Em outras palavras, isto significa dizer que o número de capilaridade, que quantifica a razão entre estas forças é muito maior do que a unidade ($Ca \gg 1$).

Outros autores estudam o deslocamento de fluidos não newtonianos em tubos capilares a partir da injeção de outros líquidos ou gases, efetuando-se uma análise da influência da capilaridade não newtoniana na curva da massa não recuperada e, desta forma, é realizada uma comparação com o deslocamento de fluidos newtonianos.

Soares et al [19] em 2001 analisam numericamente o escoamento de fluidos pseudo-plásticos em tubos capilares. A técnica de Elementos Finitos é utilizada pelos autores que apresentam previsões para a fração de massa depositada na parede do tubo

em função do número de capilaridade e do grau de pseudo-plasticidade do fluido, definido por um índice de potência n . As previsões numéricas para fluidos newtonianos concordam com os dados experimentais de Taylor [20] para a fração de massa depositada no tubo, m , em função do número de capilaridade. Os resultados obtidos para o perfil da frente de interface também concordam com os resultados experimentais apresentados por Cox [3]. As previsões numéricas ainda indicam uma redução da fração de massa depositada no tubo com o decréscimo do índice de potência, n .

Poslinsky et al [18] em 1995 apresentam uma análise experimental do deslocamento de dois fluidos viscoplásticos em tubos. Em seu estudo, o autor analisa a espessura de filme depositado na parede do tubo em função do número de capilaridade. Os resultados mostram que a espessura do filme depositado na parede do tubo para um fluido viscoplástico é menor quando comparado com um fluido newtoniano, isto significa dizer que para fluidos viscoplásticos uma maior fração de massa é recuperada para a mesma condição de escoamento.

Kamisli [14] em 2003 apresenta um estudo numérico visando analisar a deposição de fluidos pseudoplásticos nas paredes de tubos verticais e inclinados usando métodos de perturbação. Os resultados mostram uma tendência de queda no raio da bolha com a diminuição do grau de pseudoplasticidade, parâmetro n do fluido, significando que quanto mais o fluido se afasta do comportamento newtoniano, maior é a fração de massa depositada, m , para condições em que o número de capilaridade é superior a 10. Os resultados vão de encontro com os resultados experimentais e ao trabalho numérico apresentado na literatura por Soares et. al [19].

Seguindo na mesma linha de estudo em tubos capilares desenvolvido por Soares et. al [19], Poslinsky et. al. [18] e Kamisli [14], outros autores analisam a influência do número de capilaridade no escoamento de fluidos não newtonianos como Hozyak & Koelling [11] em 1997, Dimakopoulos & Tsamopoulos [4] em 2003 e Kamisli & Ryan [15] em 2003.

A influência do número de capilaridade na fração de massa líquida não recuperada para o deslocamento em meios porosos ainda pode ser considerada pouco explorada. Assim, apresenta-se a seguir alguns trabalhos relevantes que estudam o comportamento do deslocamento de líquidos em meios porosos e algumas correlações com o presente estudo são comentadas.

Fergui et al [7] em 1998 apresentam um estudo experimental do fluxo transiente de espumas (na literatura conhecido como "Foam") em meios porosos. Um dos objetivos de seus experimentos é analisar a influência de surfactantes na recuperação de líquidos por injeção de gás nitrogênio em meios porosos não consolidados. Surfactantes possuem a característica de reduzir a tensão superficial e, conseqüentemente, ocorre a redução da pressão capilar do fluido injetado e desta forma aumenta a varredura do meio, obtendo um maior fator de recuperação. Os experimentos são analisados em termos do tempo de passagem, massa recuperada, diferença de pressão do meio e perfis de saturação do gás. O gás nitrogênio é injetado a uma vazão constante e os estudos são baseados na velocidade de Darcy. No presente estudo, igualmente ao trabalho de Fergui et al [7], todos os dados experimentais são relativos ao tempo de passagem do gás, chamado de "breakthrough time". Porém, a velocidade que caracteriza o escoamento é a velocidade

de avanço do gás pelo interior do meio poroso em paralelo aos estudos em tubos capilares. Os autores mostram graficamente que a curva do tempo de passagem aumenta gradativamente e atinge um pico quando a concentração, em massa, de surfactante tende para 0,3%, decrescendo linearmente a partir do aumento da concentração de surfactante. Simultaneamente, os autores mostram que a curva da massa de líquido recuperada aumenta rapidamente e tende para um valor assintótico de 90% quando o valor de concentração, em massa, de surfactante atinge este mesmo valor de 0,3%.

Kovscek e Bertin [16] em 2003 na mesma linha de Fergui et al [7] estudam quantitativamente a mobilidade de espuma em meios porosos heterogêneos. Os autores apresentam que a mobilidade do gás na presença de espumas depende criticamente do tamanho da bolha de espuma. Esta por sua vez pode variar com a permeabilidade, porosidade, tipo de surfactante, concentração e velocidades do líquido e do gás. Os autores apresentam uma curva da influência da velocidade da frente de gás no interior do meio poroso no fluxo da fração de espumas, comparando com boa concordância com os resultados obtidos por Friedmann et. al. [8].

Moghadasi et al [17] em 2004 apresentam um estudo experimental do movimento de partículas em meios porosos durante a injeção de água. O objetivo é apresentar os resultados dos mecanismos de formação prejudicial causados pela invasão e deposição de partículas sólidas no meio. Os parâmetros independentes analisados são a vazão injetada e a concentração de partículas na água injetada. Partículas finas de óxido de alumínio suspensas na água injetada são utilizadas para simular o movimento de sólidos no meio poroso. Os autores mostram um gráfico que sugere uma relação linear crescente da in-

fluência da distância axial, na direção do fluxo, em relação à diferença de pressão do meio para diferentes vazões de água injetada. Sendo que para maiores vazões, maiores diferenças de pressões no meio poroso são evidenciados. Para a investigação do efeito do tamanho da partícula, um gráfico do gradiente de pressão em função da vazão para vários diâmetros de partículas indica igualmente uma relação linear crescente. Sendo que para menores diâmetros de partículas, maiores gradientes de pressão são medidos. O efeito da injeção de partículas no escoamento em meios porosos altera o gradiente de pressão e prejudica a análise. No presente estudo, este efeito prejudicial da injeção de partículas é nulo devido o método de recuperação ser por injeção de gás. Desta forma, o gradiente de pressão entre a entrada e a saída do experimento é constante garantido pela metodologia experimental descrita posteriormente.

Abreu [1] em 2005 apresenta um trabalho cujo objetivo é apresentar um procedimento numérico para simulação de escoamentos trifásicos, considerando os efeitos capilares e a partir deste procedimento mostrar a existência de ondas de choque transicionais. Segundo o autor, na ausência de um mecanismo estabilizador, a injeção de água e gás no deslocamento de óleo é altamente instável e gera longos canais preferenciais (caminhos preferenciais) de fluido injetado. O autor relata ainda que ondas de choque transicionais estão relacionadas a um chamado "ponto umbílico" que descreve o transporte convectivo das fases fluidas e são identificadas em escoamentos unidimensionais. Desta forma, ponto umbílico é um ponto central nos escoamentos trifásicos determinado pela viscosidade dos fluidos, sendo que a existência deste ponto leva a ocorrência de ondas de choques transicionais (não clássicas) que constituem um fenômeno estabilizador

do processo de injeção de água e gás, diminuindo a geração de canais preferenciais e tendendo a recuperar uma maior massa líquida do interior do meio poroso.

Jamialahmadi et al [12] em 2005 apresentam uma análise experimental cujo objetivo é medir a diferença de pressão e o coeficiente de transferência de calor durante fluxos monofásicos e bifásicos através de meios porosos. Para o fluxo monofásico é apresentada, graficamente, uma relação linear entre a diferença de pressão em função da distância, na direção do fluxo, sendo que a inclinação aumenta acentuadamente para maiores velocidades do líquido. No fluxo bifásico é mostrado que para baixas velocidades do gás um regime de fluxo homogêneo prevalece e minúsculas bolhas atravessam o meio sem colisões significantes, assim sendo, turbulências adicionais devido à fase líquida são muito pequenas. Os autores mostram ainda que, para baixas velocidades do gás, a interação entre bolhas de gás e líquido é desprezível, tornando baixa a turbulência. Para altas velocidades a interação entre bolhas é alta formando grandes bolhas e efeitos de turbulência associados. Além disso, é exposto que o efeito da fase líquida é mais pronunciado para regimes homogêneos do que para regimes heterogêneos e que perde influência à medida que a vazão de gás aumenta. Os resultados ainda mostram que o regime homogêneo é caracterizado por presença de bolhas esféricas e pequenas, enquanto o regime heterogêneo apresenta bolhas grandes e relativamente altas velocidades. Os dados experimentais dos fluxos monofásicos e bifásicos são comparados com correlações conhecidas e boa concordância é obtida com algumas delas.

Hoffman e Kovsky [10] em 2005 apresentam um trabalho analítico da estabilidade de frentes de deslocamentos de injeção de vapor em rochas de altas porosidades

bem como o uso de níveis padrões de simulação térmica para estudo desta estabilidade. Segundo os autores, um deslocamento instável ocorre quando um fluido injetado atravessa por caminhos preferenciais uma porção do meio que contém líquido a ser deslocado e isto ocorre geralmente quando um fluido de alta mobilidade desloca outro de baixa mobilidade. Um gráfico apresenta o efeito da condutividade térmica sobre a estabilidade do processo para várias perturbações de comprimento de onda. Segundo o estudo, pequenas condutividades térmicas induzem a formação de caminhos preferenciais de vapor e os resultados das simulações mostram que quanto maior a porosidade média, menor será a estabilidade das frentes de vapor evidenciado por menor tempo de passagem. Para realizar-se um paralelo com o trabalho de Hoffman e Kavscek [10], o cilindro que contém o meio poroso do presente estudo é longo para auxiliar no desenvolvimento e estabilidade das frentes de gás que deslocam o fluido de teste. Isto não evita a formação de caminhos preferenciais, mas permite a melhor visualização dos mesmos e garante melhor estabilidade ao deslocamento. Por se tratarem de métodos de recuperação distintos, o presente estudo não concorda com Hoffman e Kavscek [10], evidenciando que para uma maior porosidade média, maior será o tempo de passagem para uma mesma vazão de gás. Este comportamento sugere que no estudo de Hoffman e Kavscek [10] para a injeção de vapor, a formação de caminhos preferenciais ocorre de uma forma mais prematura do que no presente estudo quando se tem a injeção de gás nitrogênio.

Grattoni et al [9] em 2001 apresentam um estudo experimental cujo objetivo é analisar a influência do número de Capilaridade (N_c) e número de Bond (N_b) na recuperação de massa de óleo e água pela injeção de gás no interior de meios porosos.

O número de capilaridade é caracterizada em função da velocidade de Darcy. No estudo, o número de Bond, N_b , é uma relação entre a força de gravidade e a força capilar e o número capilar, N_c , é uma relação entre a força viscosa e forças devido ao efeito capilar. Os autores afirmam que somente o N_c e N_b são insuficientes para descrever a dinâmica do escoamento trifásico onde a drenagem gravitacional atua, definindo um novo grupo adimensional, N , como uma correlação de N_b e N_c . Os autores mostram ainda uma relação linear entre o grupo adimensional N e a recuperação total de líquido do interior do meio poroso. Um gráfico mostra o aumento de recuperação do óleo com a diminuição da velocidade do gás, tendendo a um valor aproximado de 70% quando a velocidade do gás se aproxima de zero. Na análise da recuperação de massa em função da velocidade do gás, o resultado do trabalho de Grattoni et al [9] concorda com os resultados obtidos pelo presente trabalho, pois uma menor velocidade de deslocamento do líquido pelas frentes de gás, representa uma maior recuperação de massa líquida, apesar do escoamento de Grattoni et al [9] ser trifásico e sofrer influência da drenagem gravitacional, diferente do presente estudo que o escoamento é bifásico e o efeito de drenagem é nulo. Em outras palavras diz-se que para um deslocamento quase-estático gás-líquido, a massa recuperada do interior do meio poroso é maior.

Em suma, a partir desta revisão bibliográfica nota-se que a análise capilar da influência do número de capilaridade no deslocamento de fluidos newtonianos e não newtonianos é bem compreendido e estudado pelo meio científico, porém a influência deste parâmetro no escoamento em meios porosos é pouco explorada, proposta deste estudo. Portanto, o trabalho aqui proposto tem como objetivo analisar a influência do número de

capilaridade na parcela de massa não recuperada em meios porosos artificiais e fazer um paralelo com a análise capilar de Taylor [20].

Capítulo 2

Procedimento de Caracterização dos Meios Porosos

Neste capítulo é apresentado o procedimento de caracterização dos meios porosos utilizados no presente estudo. É determinada a curva de distribuição de frequências para cada faixa de diâmetro das esferas com auxílio de programas de análise e processamento de imagens e análise estatística.

O cilindro da montagem experimental é preenchido com meios porosos artificiais constituídos de esferas de vidro transparentes e disponíveis em três faixas de diâmetros distintos conforme mostra a Tabela (2.1).

Tabela 2.1: Especificação das faixas dos diâmetros das esferas que constituem os meios porosos.

Meio Poroso (A)	Meio Poroso (B)	Meio Poroso (C)
500 a 900 μm	1000 a 1400 μm	1400 a 2000 μm

A porosidade, ϕ , é um importante parâmetro que caracteriza o meio poroso, sendo definida como uma fração do volume total do meio que é ocupado por espaços vazios. A porosidade depende fortemente da distribuição em frequência dos diâmetros das esferas que constituem o meio poroso. Além da porosidade, o meio poroso sofre influência direta da distribuição espacial das esferas no seu interior. No presente estudo, a distribuição espacial não é controlada devido a dificuldade de se constituir a mesma configuração geométrica para dois meios porosos, mesmo utilizando esferas com a mesma distribuição em frequência de diâmetros.

No presente estudo, adicionalmente ao conhecimento da faixa dos diâmetros das esferas que constituem o meio poroso é realizado uma análise e processamento de imagens para a determinação da curva da distribuição em frequência dos diâmetros das esferas para cada faixa.

2.1 Determinação dos Diâmetros das Esferas

As esferas estão disponíveis em pacotes de 25 Kg para cada faixa de diâmetro. O fabricante especifica a faixa de diâmetro das esferas contido em cada pacote e não especifica a distribuição em frequência. Uma metodologia de processamento de imagens foi utilizada com o auxílio do programa Vision Assistant versão 7.1 da National Instruments (NI) para melhor precisão na determinação do diâmetro e distribuição em frequência dos diâmetros das esferas.

O programa NI Vision Assistant 7.1 é uma ferramenta de processamento e classificação de imagens definidas pelo usuário e diversas etapas devem ser cumpridas



Figura 2.1: Recipiente para homogeneização das esferas de vidro.

para o procedimento e análise das imagens.

Cada pacote passa por uma mistura que visa a homogeneização do universo de cada faixa de diâmetro das esferas como mostra a Figura (2.1).

De maneira aleatória, três amostras de cada faixa de diâmetro são selecionadas e uma colagem criteriosa e manual de cada amostra é efetuada em cartões de dimensões aproximadas de $65 \times 65 \text{ mm}$ conforme mostra a Figura (2.2). A colagem criteriosa e manual de cada esfera evita o excesso de cola para que o brilho da mesma não prejudique a captação e processamento da imagem além de diminuir a quantidade de esferas que podem encostar umas as outras, prejudicando a leitura do diâmetro das mesmas pelo programa. A foto do cartão mostrada na Figura (2.2) é feita com controle total da intensidade luminosa para que se obtenha o maior contraste possível entre as esferas e o meio circunvizinho não permitindo que sombras ou áreas muito claras sejam identificadas pelo programa como material a ser analisado.

O cartão deve ser calibrado para as dimensões do programa e com este obje-

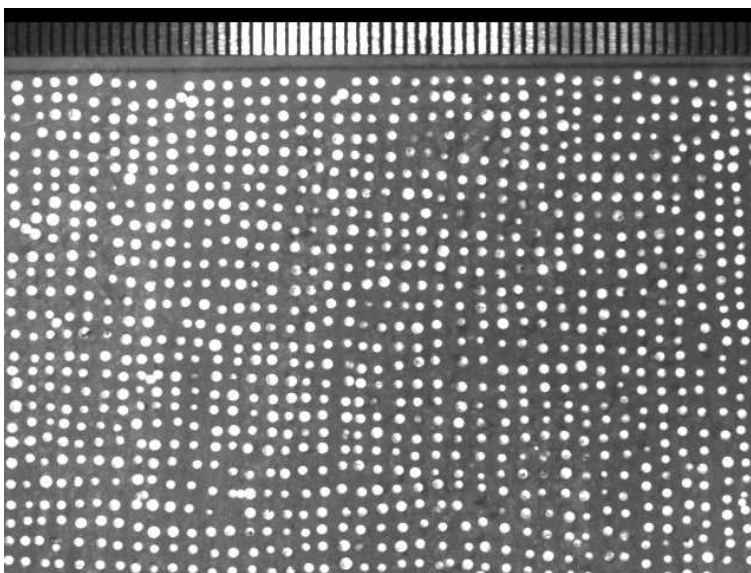


Figura 2.2: Cartão com esferas do Meio Poroso (A).

tivo é utilizada uma escala como pode ser vista na parte superior da Figura (2.2).

Para uma melhor qualidade e processamento da imagem, o programa permite o ajuste do brilho e contraste da imagem além da passagem de um filtro FFT ("Fast Fourier Transformer"), transformada rápida de Fourier, para retirada de ruídos da imagem. Este procedimento é efetuado para todos os cartões de todas as faixas de diâmetro das esferas. O programa ainda permite a seleção da área de interesse da imagem a ser processada e a exclusão de esferas unidas que podem distorcer a leitura do diâmetro. Para esse objetivo, o programa enumera cada esfera conforme mostra a Figura (2.3), permitindo a tomada de decisão do usuário para a exclusão.

Após cumprir as etapas especificadas, o programa apresenta os resultados do processamento da imagem em uma tabela mostrada na parte inferior da Figura (2.3). Nas colunas da tabela são apresentados os números respectivos das esferas e nas li-

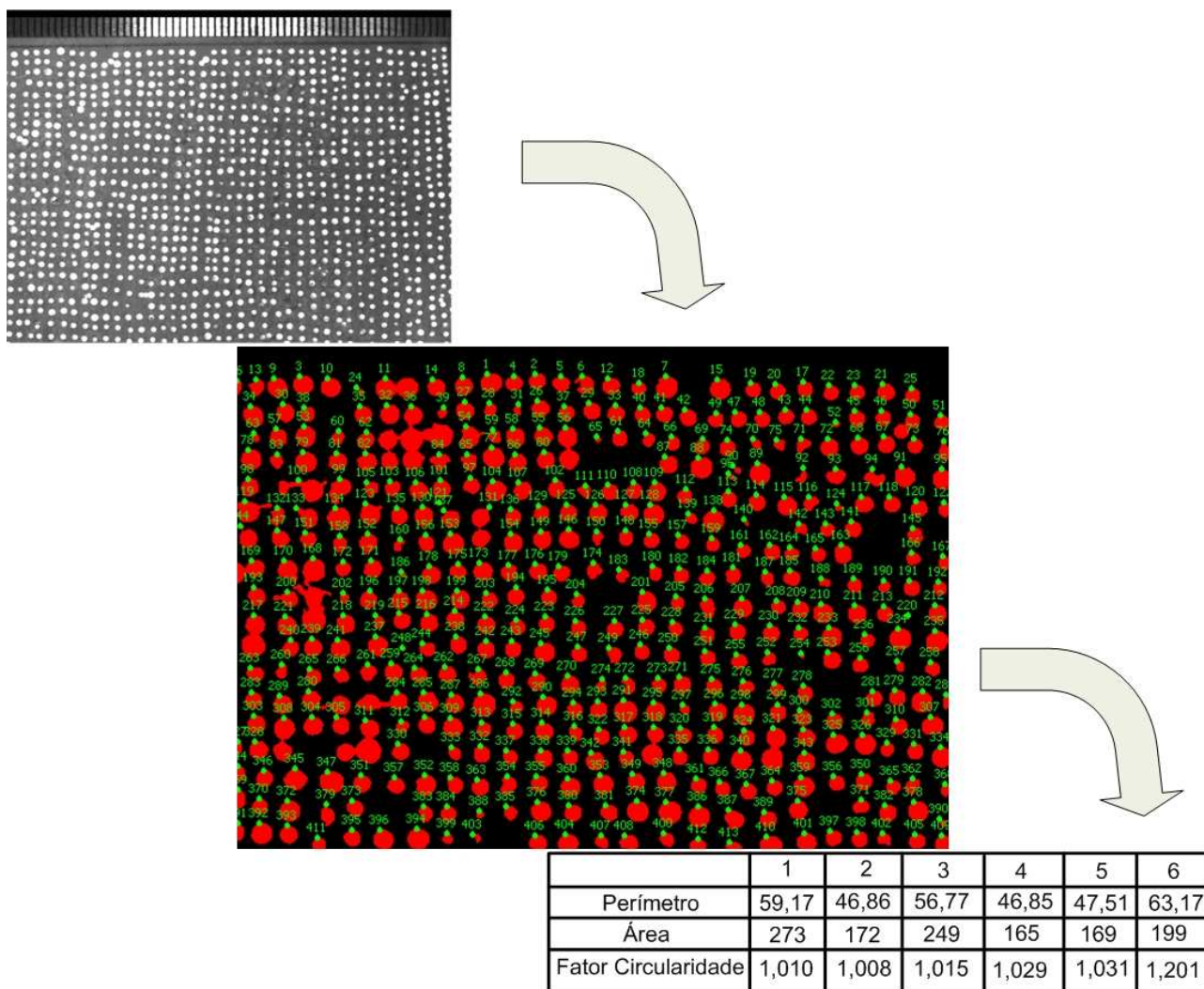


Figura 2.3: Enumeração das esferas e tabela de resultados do programa NI Vision.

nhas é possível selecionar alguns parâmetros de interesse para serem visualizados como perímetro, raio hidráulico, fator de circularidade entre outros. Estas etapas do procedimento são realizadas para todas as três amostras de cada faixa de diâmetro, totalizando nove processamentos de imagens com aproximadamente 700 esferas por cartão coladas manualmente.

2.2 Determinação da Distribuição em Frequência dos Diâmetros das Esferas

Após a obtenção da tabela com os diâmetros das esferas, os dados são exportados para tratamento estatístico e determinação da curva da distribuição em frequência dos diâmetros. As Figuras (2.4), (2.5) e (2.6) mostram esta distribuição para os meios porosos (A), (B) e (C), respectivamente. A abscissa das figuras representa o diâmetro das esferas em milímetros e a ordenada representa a frequência de ocorrência do diâmetro na amostra. Os gráficos de frequência dos diâmetros das esferas apresentam esferas fora da faixa especificada pelo fabricante. Apesar desta evidência, tais esferas não são exclusas e estes gráficos são utilizados apenas como informação adicional na caracterização dos meios porosos utilizados no presente estudo.

A Tabela (2.2) mostra o diâmetro médio, o desvio padrão e o fator de circularidade dos diâmetros das esferas. O fator de circularidade permite especificar o quão circular, em um plano, são as esferas e quanto mais próximo esse fator se aproxima da unidade (1), mais circular é a esfera.

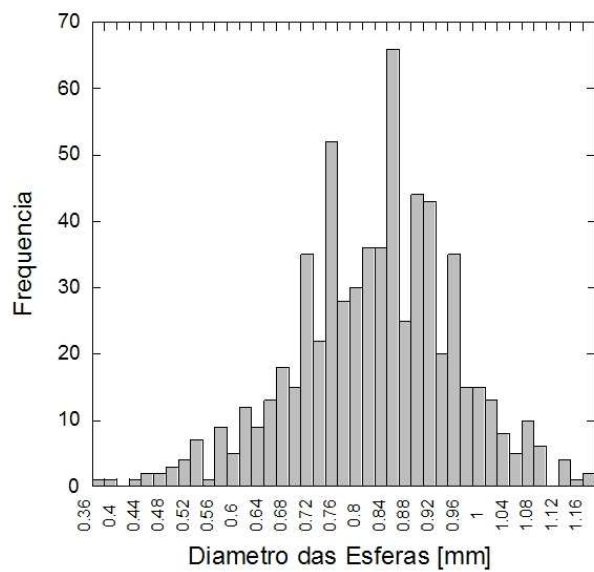


Figura 2.4: Distribuição em frequência dos diâmetros das esferas para o Meio Poroso (A).

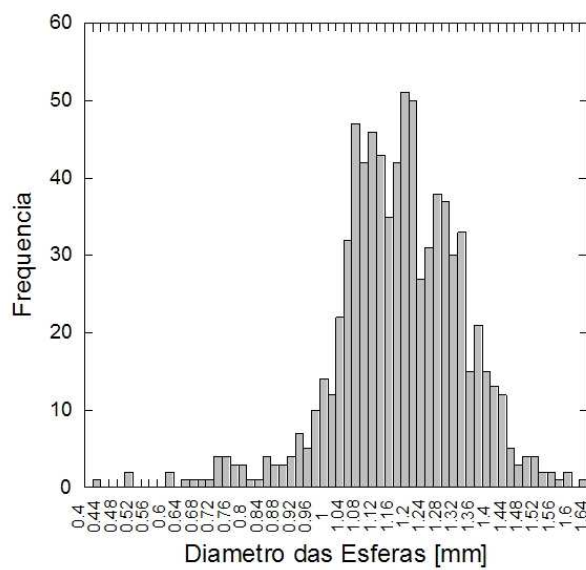


Figura 2.5: Distribuição em frequência dos diâmetros das esferas para o Meio Poroso (B).

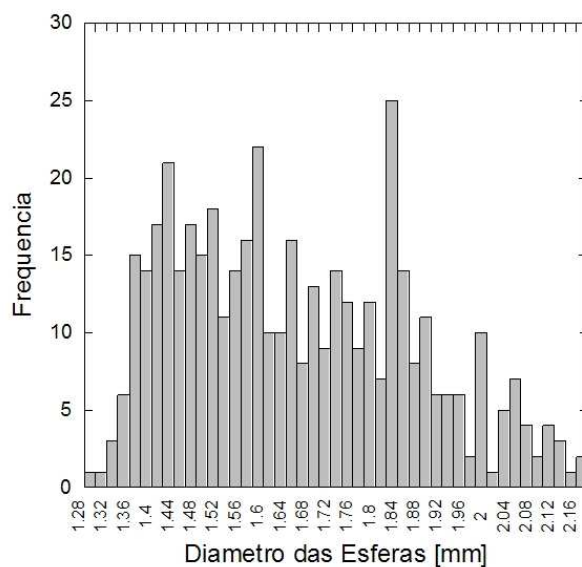


Figura 2.6: Distribuição em frequência dos diâmetros das esferas para o Meio Poroso (C).

Tabela 2.2: Especificação do diâmetro médio, desvio padrão e fator de circularidade das esferas dos meios porosos.

	Meio Poroso (A)	Meio Poroso (B)	Meio Poroso (C)
Diâmetro Médio [mm]	0,81	1,17	1,65
Desvio Padrão [mm]	0,13	0,16	0,21
Fator de Circularidade Médio	1,01	1,02	1,03

2.3 Método de Determinação da Porosidade

A porosidade, ϕ , quantifica um percentual do volume total do meio que é ocupado por espaços vazios e depende fortemente da distribuição em frequência dos diâmetros das esferas que constituem o meio poroso.

No presente estudo, a porosidade é medida pela fração entre o volume total de líquido que é adicionado ao meio pelo volume total do meio. Utiliza-se uma amostra de esferas para obtenção de cada ponto na curva da massa perdida. Esta variação de meios porosos determina uma pequena variação da porosidade devido as alterações de frequências dos diâmetros das esferas. Desta forma, a Tabela (2.3) mostra a porosidade média dos meios montados para cada faixa de diâmetro das esferas bem como o desvio padrão. Percebe-se baixa variação no valor da porosidade entre as faixas de diâmetro das esferas. Portanto, o desvio de comportamento identificado em cada curva da massa perdida para cada faixa de diâmetro é correlacionado ao diâmetro médio das esferas que constituem o meio. Acrescenta-se ainda que na obtenção dos dados deste estudo, a medição da porosidade é relativa a cada meio poroso montado e não se baseia na média mostrada na Tabela (2.3).

Como foi dito na introdução, este estudo visa fazer um paralelo com o estudo capilar de Taylor [20], portanto a partir da porosidade do meio poroso pode-se determinar um diâmetro de capilar equivalente. A porosidade é definida conforme Equação (2.1), sendo V_L e V_T o volume total de líquido adicionado e o volume total do meio poroso, respectivamente.

Tabela 2.3: Especificação da porosidade média e do desvio padrão dos meios porosos.

	Meio Poroso (A)	Meio Poroso (B)	Meio Poroso (C)
Porosidade Média	0,39	0,38	0,39
Desvio Padrão	0,01	0,01	0,02

$$\phi = \frac{V_L}{V_T} \quad (2.1)$$

O volume total do cilindro, V_T , é dado por $V_T = \frac{\pi \cdot (D)^2}{4} \cdot L$, sendo D e L , respectivamente, o diâmetro interno e o comprimento do cilindro. Substituindo o volume, V_T , e rearranjando a Equação (2.1), o volume total do líquido adicionado ao meio poroso, V_L , pode ser calculado conforme a Equação (2.2):

$$V_L = \frac{\pi \cdot (D)^2}{4} \cdot \phi \cdot L \quad (2.2)$$

Rearranjando a Equação (2.2), o diâmetro interno do capilar equivalente ao meio poroso, d_c , aparece na Equação (2.3).

$$V_L = \frac{\pi \cdot (d_c)^2}{4} \cdot L \quad (2.3)$$

Portanto, para mesmo volume total de líquido, V_L , e mesmo comprimento, L , do meio poroso a razão entre o diâmetro do capilar equivalente, d_c , e do meio poroso, D , é representada pela raiz quadrada da porosidade, conforme Equação (2.4).

$$\frac{d_c}{D} = \sqrt{\phi} \quad (2.4)$$

Capítulo 3

Procedimento de Caracterização do Fluido de Teste Água-PEG

O fluido de teste é uma mistura de água e Polietileno Glicol (PEG), polímero cuja massa específica é de 600 Kg/m^3 , permitindo controlar o patamar de viscosidade da mistura. A viscosidade dinâmica, μ , e a massa específica, ρ , do fluido de teste são dependentes da solubilidade do polímero na água. O PEG é misturado até que se obtenha uma perfeita homogeneização e em seguida inicia-se a medição dos parâmetros que caracterizam o fluido de teste.

3.1 Método de Medição da Massa Específica

Após a preparação da mistura, a massa específica é medida a partir de um volume calibrado. É realizada a pesagem do volume calibrado vazio. Em seguida, se dá a pesagem do volume calibrado preenchido com fluido de teste. As pesagens são realizadas



Figura 3.1: Balança Eletrônica, BEL - engineering, MARK. 0.0001, Faixa: 0-200g.

com uma balança analítica mostrada na Figura (3.1). A massa específica do fluido é então obtida pela razão entre a massa do líquido e o volume calibrado. Este procedimento de medição é efetuado cinco vezes, sendo a massa específica do fluido igual ao valor médio das cinco medidas. O fluido utilizado para todos os testes do presente trabalho possui massa específica média igual a $1057\text{Kg}/\text{m}^3$.

3.2 Método de Medição da Viscosidade

Para medir a viscosidade cinemática da mistura água-PEG utiliza-se o viscosímetro mostrado na Figura (3.2). Este viscosímetro é um instrumento que se baseia no

tempo de escoamento do fluido a ser medido em um tubo capilar para uma determinada distância vertical. Cada viscosímetro possui uma constante característica que depende basicamente do diâmetro do capilar associado. A viscosidade cinemática, ν , do fluido de teste é calculada multiplicando o tempo de escoamento do fluido na distância característica pela constante do viscosímetro. No presente estudo têm-se o cuidado de escolher um viscosímetro que possui uma constante que maximize o tempo de escoamento para que a incerteza de medição seja minimizada. Adota-se para este trabalho um tempo superior a 200 segundos para a medição da viscosidade. Este procedimento de leitura de tempo para a medição da viscosidade cinemática é realizado cinco vezes e a média é mais uma vez escolhida como valor adotado para a viscosidade cinemática do fluido de teste. A viscosidade dinâmica do fluido de teste é obtida multiplicando esta média da viscosidade cinemática pela massa específica.

Neste método de medição de viscosidade é utilizado um banho termostático para equiparar a temperatura do fluido no interior do viscosímetro. O banho termostático mostrado na Figura (3.3) é constituído de um recipiente preenchido com água destilada e deionizada, possuindo um aquecedor e um mostrador digital que permite o aquecimento da água até um valor especificado pelo usuário. O método de medição com auxílio do banho termostático consiste em mergulhar o viscosímetro preenchido com fluido de teste e aguardar até que seja atingida a temperatura de equilíbrio do mostrador digital para efetuar a leitura do tempo de escoamento. Neste trabalho considera-se um tempo mínimo de aproximadamente 10 minutos para atingir este equilíbrio.

O instrumento ainda possui uma recirculação de resfriamento que deve ser



Figura 3.2: Viscosímetro utilizado na medição da viscosidade do fluido de teste.

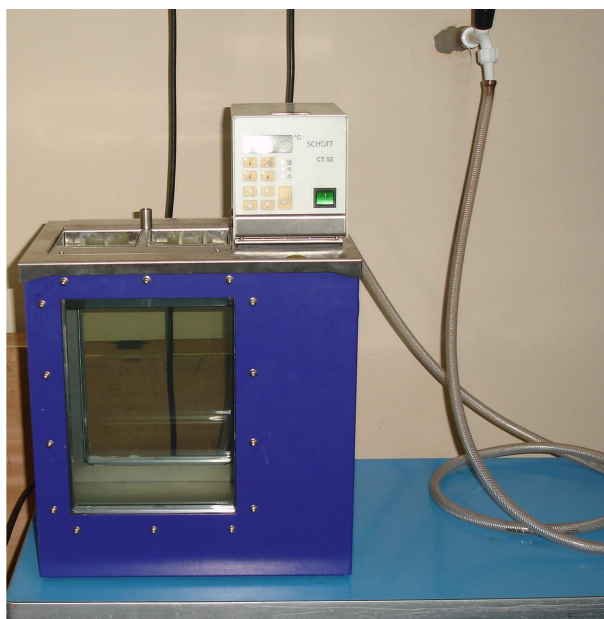


Figura 3.3: Banho Termostático utilizado para auxiliar na medição da viscosidade do fluido de teste.

ligado a uma fonte externa de fluido para medições a altas temperaturas que não é o caso do presente trabalho. Esta recirculação de fluido de resfriamento está mostrada na Figura (3.3) pela mangueira que liga a torneira externa ao equipamento.

3.3 Método de Medição da Tensão Superficial

A tensão superficial do fluido de teste, σ , como descrito anteriormente, é um importante parâmetro que caracteriza o efeito capilar e é medida com auxílio do tensiômetro KSV Sigma 702 mostrado na Figura (3.4).

O método do anel, como mostra a Figura (3.5), é utilizado pelo equipamento para medição da tensão superficial com resolução de $0,001 \text{ mN/m}$. O tensiômetro imerge o anel no fluido a ser medido e o emerge vagarosamente, medindo a tensão necessária para o rompimento da interface, especificando o valor da tensão superficial no mostrador digital. Para efetuar uma nova medida, o recipiente que contém a mistura, chamado de cadinho, deve ser bem limpo e para a limpeza do anel de medição recomenda-se que seja utilizado um bico de bunsen para eliminar as impurezas que afetam substancialmente a medição. Este procedimento de medição é realizado cinco vezes sendo a média o valor adotado para a tensão superficial do fluido. Todas as medições são efetuadas à temperatura ambiente do laboratório, $25 \text{ }^\circ\text{C}$, mesma temperatura que são realizados os testes. O fluido utilizado para todos os testes do presente trabalho possui tensão superficial média igual a $57,0 \text{ mN/m}$.

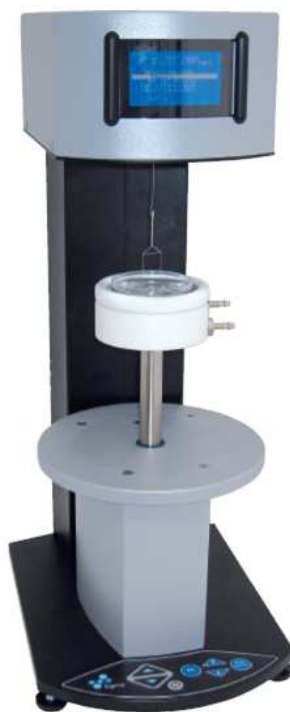


Figura 3.4: Tensiômetro Sigma KSV 702 para medição da tensão superficial do fluido de teste.



Figura 3.5: Anel utilizado pelo tensiômetro para medição da tensão superficial.

3.4 Influência da Temperatura e da concentração de PEG, em massa, na curva da Viscosidade Cinemática do Fluido de Teste

A viscosidade do fluido água-PEG sofre uma variação considerável com a temperatura conforme mostra a Figura (3.6). Desta forma, é necessário um monitoramento da temperatura durante a obtenção dos dados dos experimentos. Os testes são realizados com termômetro próximo da montagem experimental e o controle da temperatura ambiente do laboratório de testes é auxiliado por um aparelho de ar condicionado. Todos os dados experimentais são obtidos com uma mistura de 33 %, em massa, de PEG na água e temperatura do laboratório de 25 °C.

A Figura (3.6) mostra que uma mistura de água e PEG de maior concentração, em massa, deste polímero possui um decaimento maior da viscosidade para uma mesma variação de temperatura. Isto é evidenciado pela maior inclinação da reta do gráfico para a mistura com 33 % de PEG, em massa, em relação às outras misturas. Isto significa dizer que uma maior concentração de PEG na água indica uma maior queda de viscosidade com o aumento da temperatura.

A Figura (3.7) mostra perfis não lineares da variação da curva da viscosidade da mistura água-PEG em função da concentração, em massa, de PEG influenciado pela temperatura. Para uma específica temperatura, este gráfico permite à obtenção de uma mistura com determinada viscosidade de acordo com o percentual de polímero adicionado à mistura. Todos os dados do presente estudo são obtidos com 33 % de concentração de

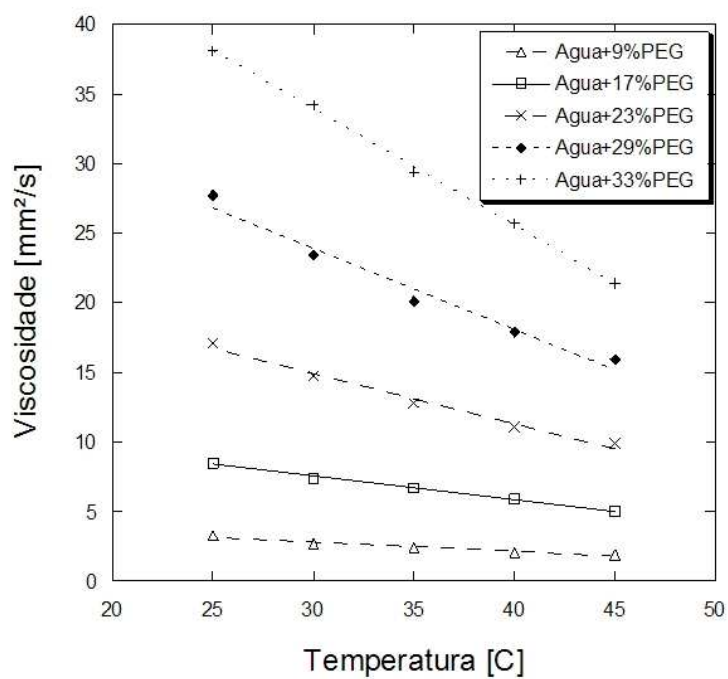


Figura 3.6: Gráfico da influência da temperatura no decaimento da viscosidade cinemática do fluido para várias concentrações de PEG, em massa.

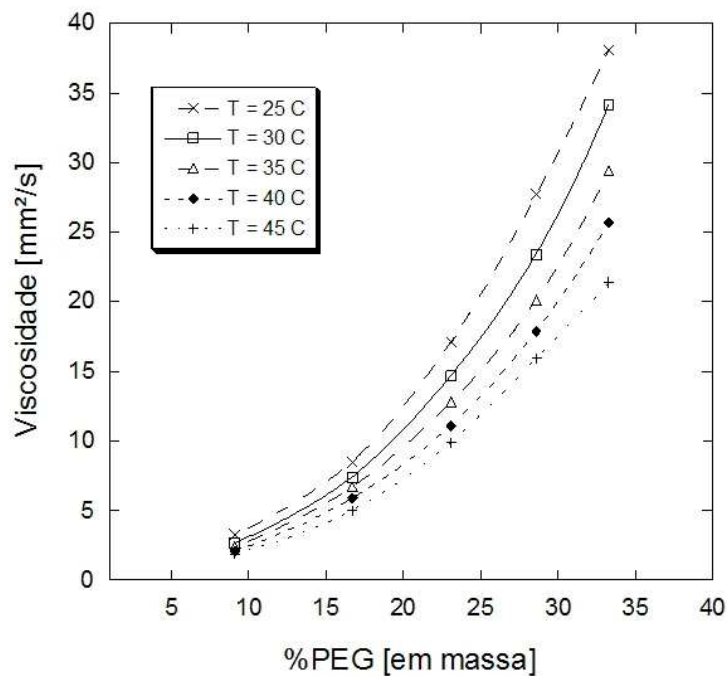


Figura 3.7: Gráfico da influência da concentração de PEG, em massa, na curva da viscosidade cinemática para várias temperaturas.

PEG, em massa, e a temperatura ambiente de 25 °C. Isto permite concluir, a partir Figura (3.7), que o fluido obtido possui uma viscosidade cinemática média em torno de 39 cSt.

Capítulo 4

Procedimento Experimental

Neste capítulo são apresentados os métodos de cálculo e medição dos parâmetros relativos ao gás nitrogênio e ao fluido de teste que determinam os resultados obtidos no presente estudo.

É apresentada a metodologia de obtenção dos resultados deste estudo. O princípio básico dos testes experimentais é a medição da massa de fluido não recuperada no interior do meio poroso durante o tempo de passagem do nitrogênio pelo meio. Porém, a visualização do deslocamento do fluido pelas frentes de gás nitrogênio é extremamente importante e possibilita a observação de fenômenos recorrentes neste tipo de deslocamento. Para este objetivo, uma filmagem qualitativa é realizada para a visualização do deslocamento, sendo uma ferramenta auxiliar para a discussão dos resultados.

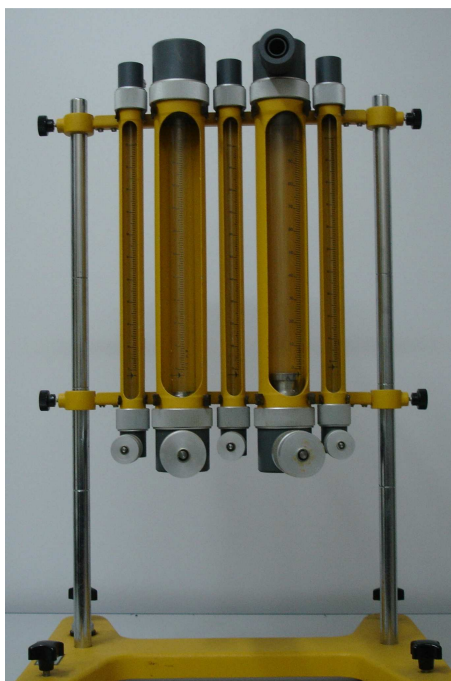


Figura 4.1: Rotômetros utilizados na medição da vazão volumétrica do gás nitrogênio.

4.1 Método de Medição da Vazão Volumétrica do Gás Nitrogênio

São utilizados na montagem experimental dois dos rotômetros mostrados na Figura (4.1) que permitem a medição em duas faixas de vazões de 15 a 250 ml/min e 200 a 1750 ml/min . Evita-se neste estudo as vazões dos extremos dos rotômetros devido a instabilidade que é identificada. Cada rotômetro é dotado de uma válvula agulha posicionada na parte inferior que permite o controle da passagem de gás. Uma mangueira proveniente do cilindro direciona o gás nitrogênio para a parte inferior do rotômetro, o gás passa internamente pela válvula e pelo rotômetro, sendo direcionado ao meio poroso pela parte superior também por meio de mangueiras.

A leitura da vazão volumétrica de gás que atravessa o instrumento é realizada em uma escala graduada de vidro na posição determinada por meio de um flutuador que permanece em um ponto de equilíbrio dependente da relação entre o empuxo que o gás proporciona e o peso do flutuador. Este empuxo é proporcional à vazão de gás que atravessa o instrumento e esta vazão é dependente do controle propiciado pela restrição da válvula agulha.

A variação da vazão volumétrica do nitrogênio influencia a velocidade das frentes de gás que avançam pelo meio, alterando o número de capilaridade do escoamento e obtendo uma variação na recuperação da massa de fluido do interior do meio poroso. Portanto, a vazão volumétrica de gás nitrogênio é determinante para a modificação do número de capilaridade do escoamento.

4.2 Método de Medição da Massa Perdida do Fluido de Teste

O objetivo deste estudo é analisar a influência do número de capilaridade do escoamento na massa de fluido não recuperada do interior de meios porosos pela injeção de gás nitrogênio. Taylor [20] estuda este deslocamento em tubos capilares e os resultados sugerem que o número de capilaridade é determinante do escoamento. Os resultados obtidos no presente estudo permitem uma avaliação da influência deste parâmetro como governante do escoamento em leitos porosos. Taylor [20] define que a fração de massa perdida, m_p , no interior dos tubos capilares é dada por uma relação entre a velocidade

de avanço da bolha de gás, U , e a velocidade média do fluido recuperado, u , conforme Equação (4.1)

$$m_p = \frac{U - u}{U} \quad (4.1)$$

No estudo de Taylor [20], o cálculo da massa perdida, segundo a Equação (4.1), é facilitada pela possibilidade de se obter diretamente a velocidade de avanço da bolha de gás, U , devido a interface de deslocamento em tubos capilares ser única e visível. Diferentemente, no escoamento em meios porosos onde o gás avança por diversas frentes no interior do meio, para cada vazão volumétrica de gás, a massa perdida, m_p , e a velocidade média, u , são medidas. Desta forma, obtém-se indiretamente a velocidade, U , chamada de velocidade média global de avanço do gás, rearranjando a equação (4.1). Este procedimento é detalhado, posteriormente, na descrição do experimento. A Figura (4.2) apresenta uma comparação esquemática do deslocamento de líquidos por gás do interior de meios porosos e de tubos capilares.

No escoamento em meios porosos, diferentemente do escoamento em tubos capilares, as velocidades, u e U , são influenciadas pela porosidade do meio devido às várias frentes concorrentes de gás formadas no escoamento. A fração de massa perdida, m_p , é medida para cada vazão volumétrica de gás nitrogênio, $m_p = \frac{m_T - m_r}{m_T}$, onde m_T e m_r representam a massa total de líquido adicionada ao meio poroso e a massa recuperada, respectivamente.

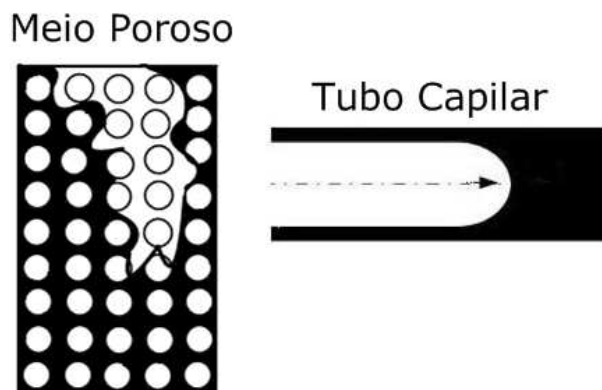


Figura 4.2: Representação esquemática do deslocamento de líquidos por gás do interior de meios porosos e de tubos capilares.

4.3 Método de Medição da Velocidade Média de Recuperação do Fluido de Teste

A velocidade média de recuperação do fluido de teste, u , é obtida conforme Equação (4.2), sendo Q_f a vazão volumétrica do fluido, A a área da seção transversal interna do cilindro e ϕ a porosidade do meio poroso.

$$u = \frac{Q_f}{A \cdot \phi} \quad (4.2)$$

Para uma dada vazão volumétrica de gás, mede-se a massa do fluido de teste recuperada, m_r , no tempo de passagem, t , e têm-se a vazão mássica do fluido recuperado como $\dot{m} = \frac{m_r}{t}$. A vazão volumétrica do fluido de teste é dada pela fração entre a vazão mássica e a massa específica do fluido de teste, $Q_f = \frac{\dot{m}}{\rho}$. Desta forma, é possível obter a velocidade média de recuperação do fluido de teste, conforme a Equação (4.2), levando em consideração a influência da porosidade.

4.4 Método de Obtenção da Velocidade Média Global de Avanço do Gás

No deslocamento gás-líquido em meios porosos, o gás avança por meio de diversas frentes concorrentes, sendo influenciado pela porosidade do meio. Portanto, a velocidade, U , é aqui chamada de velocidade média global de avanço do gás.

Faz-se necessária a medição da velocidade média do fluido de teste, u , conforme Equação (4.2) para um rearranjo da Equação (4.1) e a partir de então obter indiretamente a velocidade média global de avanço do gás conforme a Equação (4.3).

$$U = \frac{u}{1 - m_p} \quad (4.3)$$

4.5 Método de Obtenção do Número de Capilaridade

A Capilaridade, Ca , do escoamento é definida conforme Taylor [20] e evidencia uma relação entre forças viscosas e forças de tensão superficial provenientes do efeito capilar do escoamento, conforme Equação (4.4). Alguns autores caracterizam a capilaridade em função da velocidade média do fluido recuperado, outros autores caracterizam em função da velocidade de Darcy. A capilaridade é aqui definida em função da velocidade média global de avanço do gás, U , em paralelo aos estudos de deslocamento de líquidos em tubos capilares.

$$Ca = \frac{\mu \cdot U}{\sigma} \quad (4.4)$$

Nesta equação, μ e σ são parâmetros físicos e constantes, respectivamente, a viscosidade dinâmica e a tensão superficial do fluido de teste e U é a velocidade média global de avanço do gás, obtida conforme Equação (4.3).

4.6 Descrição da Montagem Experimental

A Figura (4.3) mostra esquematicamente a especificação das dimensões da montagem experimental projetada e a Figura (4.4) mostra a foto da seção de teste. Todas as indicações do próximo parágrafo se referem à Figura (4.3).

A bancada é projetada em acrílico para possibilitar a visualização do escoamento e filmagem dos experimentos. Uma célula retangular externa, indicação 6, envolve o cilindro de depósito do meio poroso, indicação 5, e o espaço entre a célula e o cilindro permite o preenchimento com água ou glicerina para minimizar os efeitos de difração da luz e permitir melhor visualização do deslocamento. O cilindro do meio poroso é longo para auxiliar o desenvolvimento e estabilidade das frentes de gás, minimizando a incerteza na tomada do tempo de passagem. A vedação do gás é crítica para os testes. Para este objetivo, o cilindro e a célula retangular externa possuem encaixe com interferência, indicação 10, sob pressão nas tampas superior e inferior, indicações 1 e 2, sendo auxiliado por anéis de vedação de borracha, indicações 7 e 8. A pressão nas tampas proveniente de porcas e parafusos e um anel externo ("O-ring"), indicação 9, na câmara de uniformização do gás, indicação 3, também auxiliam esta vedação. O cilindro e a célula retangular se encaixam por interferência nas tampas, desta forma, os flanges, indicação 11, da célula retangular externa devem ser rígidos o suficiente para possibilitar o aperto pelos parafu-

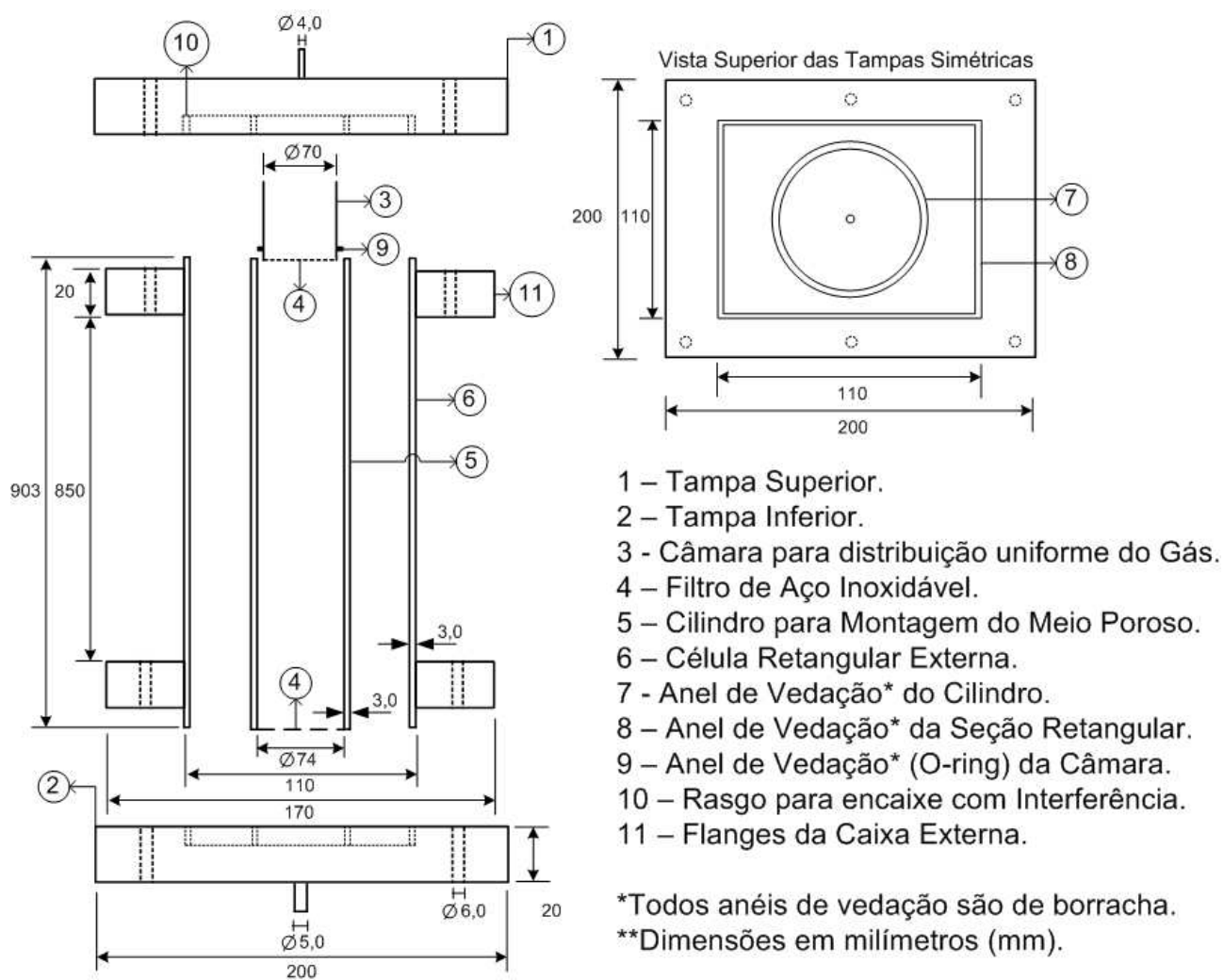


Figura 4.3: Dimensões da montagem experimental.

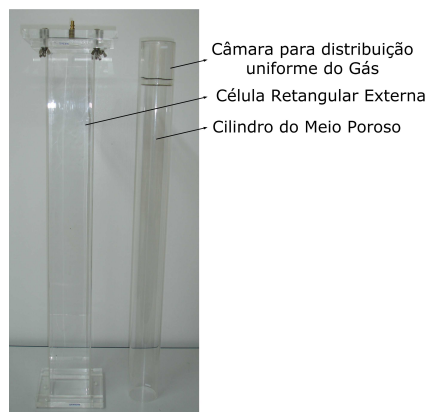


Figura 4.4: Foto da montagem experimental.

sem causar a flexão das tampas. A montagem possui dois filtros de aço inoxidável, indicação 4, um na entrada e um na saída. Os filtros possuem pequena malha para evitar que as esferas sejam arrastadas para a linha, prejudicando a atuação das válvulas e a leitura do tempo de passagem.

4.7 Metodologia de Obtenção dos Dados Experimentais

Descreve-se nesta seção a metodologia de obtenção dos dados para análise dos resultados do trabalho. Esta metodologia é descrita passo a passo de modo que se possa ter uma visão sistêmica do processo de injeção do gás, medição e cálculo dos parâmetros com as devidas referências às equações já especificadas anteriormente. A metodologia faz referência à Figura (1.4) da representação esquemática da montagem experimental.

O teste é iniciado com o fechamento da tampa inferior com auxílio de porcas e parafusos, encaixando o cilindro e a célula externa com interferência nos rasgos da tampa. Com a tampa superior aberta e logo após a inserção do filtro de saída no fundo do cilindro,

inicia-se o preenchimento do cilindro com as esferas, este preenchimento se dá sempre da mesma maneira, visando minimizar a influência da distribuição espacial das esferas no interior do cilindro . As esferas devem estar extremamente secas, limpas e sem sujeiras incrustadas para que não influencie nos parâmetros que caracterizam o fluido e o meio poroso. Uma mangueira é conectada à saída (S) e direcionada ao recipiente coletor (Rec), sendo a válvula (V5) fechada. Após a montagem do meio poroso, a válvula (V5) é aberta e o fluido de teste já devidamente preparado é adicionado ao meio poroso, preenchendo-o totalmente. Esta adição se dá de maneira suave e gradativa, preenchendo o meio poroso até que o fluido atinja um nível pouco superior ao nível das esferas. Em seguida a válvula (V5) é fechada. Este volume residual permite, posteriormente, um escoamento preliminar do fluido no interior do meio pela injeção de gás, garantindo o completo preenchimento do mesmo além de preencher a mangueira que liga a saída (S) ao recipiente coletor (Rec). Para finalizar a montagem, a câmara de uniformização do gás com o anel ("o-ring") é posicionada na parte superior do cilindro, então , a tampa superior é fechada.

Neste momento, o meio poroso se encontra montado e o fluido de teste adicionado ao meio. Então, conecta-se as mangueiras do cilindro de nitrogênio com a linha e da linha com o rotâmetro e a entrada (E) do experimento. Com todas as válvulas fechadas, é iniciada a abertura da válvula (V1), para a pressurização da linha. O manômetro (M1) indica a pressão do cilindro de nitrogênio. Abre-se a válvula (V2) até que o manômetro (M2) indique uma pressão na linha de 5 bar. Os testes são realizados mantendo-se este manômetro sempre com a pressão indicada de 5 bar, regulada pela abertura da válvula (V2). O manômetro (M3) é o instrumento de medição para ajuste fino da pressão na en-

trada do rotâmetro (R) e sua indicação se inicia no momento em que é aberta a válvula (V3). Esta válvula (V3) é aberta até que o manômetro (M3) indique uma pressão de 2 bar, sendo que todos os dados dos testes são obtidos com o manômetro (M3) indicando esta pressão constante.

O rotâmetro (R) é o instrumento responsável pelo ajuste de vazão volumétrica do gás nitrogênio que atravessa o meio poroso e este ajuste é regulado pela abertura da válvula agulha (V4). Esta vazão é mantida constante, sendo evidenciada pela estabilidade do flutuador no interior do instrumento durante todo o tempo de passagem do gás pelo meio poroso. Os rotâmetros são responsáveis por uma grande perda de carga na linha, induzindo uma significativa redução de pressão até a entrada (E) da montagem. Esta perda de carga localizada é muito maior que a variação da carga durante o tempo de passagem. Isso garante que o teste é realizado com vazão constante.

Com a linha pressurizada e a vazão de gás ajustada pela válvula (V4) do rotâmetro, a válvula (V5) é aberta e o gás desloca de forma preliminar o fluido no interior do meio poroso até que o nível do fluido decresça vagarosamente e atinja o mesmo nível das esferas no interior do meio. Neste instante a válvula (V5) é fechada e a montagem está pronta para ser iniciado o teste. A massa preliminar de fluido que foi possivelmente recuperada até este instante é pesada e reduzida da massa total adicionada ao meio, garantindo o preenchimento do meio, da mangueira de saída e não influenciando os testes.

Neste momento, com a linha pressurizada e o meio poroso preenchido de fluido no mesmo nível das esferas no interior do cilindro de teste é iniciada a medida do tempo de passagem (t). O teste se inicia com a reabertura da válvula (V5) e neste

momento disparando-se o cronômetro. O deslocamento do fluido de teste pelo gás é iniciado, observando visualmente o exato momento em que a primeira bolha de gás atinge a saída (S), momento este em que é acionada a parada do cronômetro, fazendo-se a leitura do tempo de passagem.

A massa do fluido recuperada, m_r , é medida e a fração de massa perdida, m_p , é obtida considerando a massa total, m_T , adicionada ao meio poroso como $m_p = \frac{m_T - m_r}{m_T}$. A vazão mássica do fluido recuperado, \dot{m} , é a razão da massa recuperada pelo pelo tempo de passagem, $\dot{m} = \frac{m_r}{t}$. A vazão volumétrica do fluido recuperado, Q_f , é a razão da vazão mássica pela massa específica do fluido, $Q_f = \frac{\dot{m}}{\rho}$. Obtém-se assim a velocidade média do fluido recuperado, u , a partir da Equação (4.2). Medida a fração de massa perdida e a velocidade média do fluido recuperado, a velocidade média global de avanço do gás, U , pode ser inferida conforme a Equação (4.3). O número de Capilaridade, Ca , é obtido conhecendo-se os parâmetros que caracterizam o fluido e a velocidade média global de avanço do gás, conforme Equação (4.4). Assim, tendo-se a massa perdida do fluido e obtido o número de Capilaridade correspondente, têm-se um ponto no gráfico (m_p x Ca) para uma dada vazão volumétrica do gás. Após este procedimento, a montagem é desmontada e lavada devidamente com água, sendo as esferas lavadas exaustivamente para evitar que o polímero impregnado nas mesmas prejudique as próximas medições.

A obtenção de outros pontos é possível com a variação da vazão volumétrica do gás no rotâmetro, executando novamente a metodologia descrita neste item 4.7, obtendo novos valores de massa líquida de fluido perdida e número de capilaridade.

Capítulo 5

Resultados

Este capítulo apresenta os resultados obtidos através do procedimento experimental descrito no capítulo anterior. Os resultados apresentados na curva da fração de massa perdida são discutidos em função da influência do número de capilaridade e do diâmetro médio das esferas que constituem o meio. É realizada uma comparação com o trabalho de Taylor [20] quanto à influência do número de capilaridade na curva da massa perdida do escoamento.

A grande maioria dos estudos de meios porosos da literatura caracterizam o número de capilaridade em função da velocidade de Darcy ou da velocidade média de recuperação da massa líquida. Neste trabalho experimental é importante salientar a maneira pela qual é caracterizado o número de capilaridade do escoamento, conforme Equação (4.4), evidenciando o paralelo traçado com o estudo capilar de Taylor [20]. Tal parâmetro é caracterizado em função da velocidade de avanço do gás que neste estudo é chamada de velocidade média global de avanço do gás, U , devido a influência da porosi-

dade e do fato do gás avançar no interior do meio poroso por diversas frentes concorrentes. Esta velocidade surge de um balanço de forças normais na interface do deslocamento gás-líquido. Tal velocidade é obtida indiretamente, conforme Equação (4.3), a partir da medição da velocidade média de recuperação da massa líquida e da massa perdida. No estudo de Taylor [20], o número de capilaridade do escoamento é caracterizada também em função da velocidade de avanço da interface gás-líquido, conforme Equação (4.4). Porém, no estudo de Taylor [20], esta velocidade é medida diretamente devido a interface de deslocamento ser única e visível, característica do escoamento em capilares e a massa perdida é obtida em função desta velocidade e da velocidade média do fluido à frente da interface, conforme Equação (4.1).

As Figuras (5.1), (5.2) e (5.3) mostram a influência do número de capilaridade na curva da fração de massa perdida do fluido para os meios porosos (A), (B) e (C), respectivamente. Os três gráficos possuem igual tendência à assintotização da curva da massa perdida com o aumento gradativo do número de capilaridade. Ainda nas Figuras (5.1), (5.2) e (5.3), observa-se que a curva da massa perdida assintotiza para um valor aproximado de 0,9, 0,85 e 0,8 quando o número de capilaridade tende para um valor de 0,01, 0,02 e 0,03, respectivamente. Isto significa dizer que a curva da massa perdida assintotiza nos meios porosos (A), (B) e (C) quando as forças de tensão superficial são superiores às forças viscosas de 100, 200 e 300 vezes, respectivamente.

A Figura (5.4) mostra a influência do número de capilaridade na curva da massa perdida para os três meios porosos (A), (B) e (C). Desta forma, percebe-se que maiores valores de massa perdida são obtidos para o meio poroso (A), que possui o

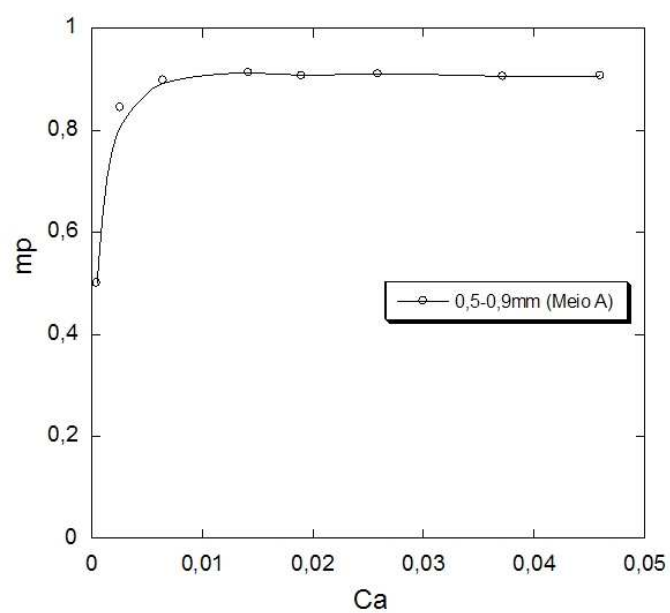


Figura 5.1: Influência do número de Capilaridade na curva da massa perdida no Meio Poroso (A).

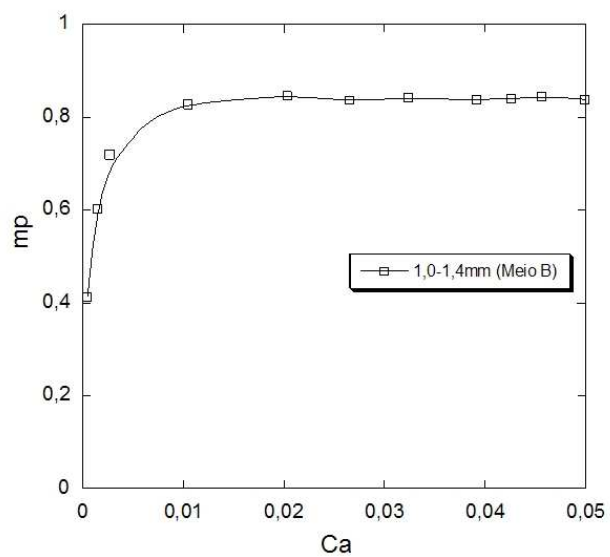


Figura 5.2: Influência do número de Capilaridade na curva da massa perdida no Meio Poroso (B).

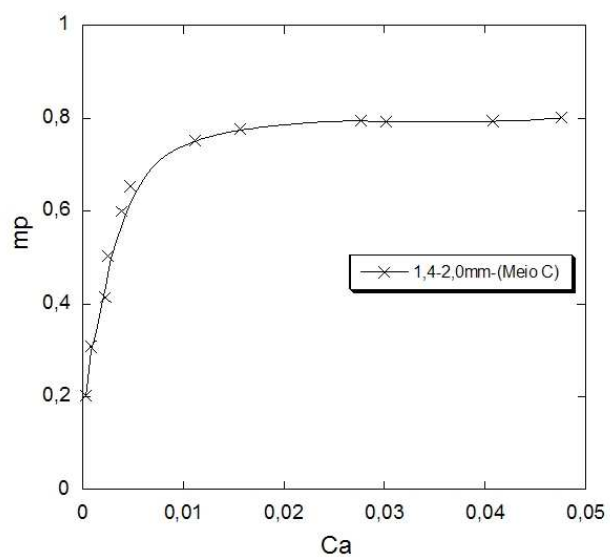


Figura 5.3: Influência do número de Capilaridade na curva da massa perdida no Meio Poroso (C).

menor diâmetro médio de esferas. Isto equivale dizer que para as mesmas condições de escoamento (mesmo número de capilaridade), a eficiência de varredura do gás neste meio poroso é menor que nos meios porosos (B) e (C), recuperando menor quantidade de líquido.

A Figura (5.4) sugere ainda que, para qualquer meio, quando a curva atinge a assintotização, ocorre a estabilização da massa perdida, ou seja, para quaisquer condições adicionais de desequilíbrio entre as forças viscosas e as forças de tensão superficial do escoamento, nenhuma massa adicional líquida é recuperada. Em outras palavras, diz-se que para qualquer combinação de parâmetros do escoamento onde o número de capilaridade seja maior que o valor da capilaridade de assintotização não há massa líquida adicional perdida.

Ainda na Figura (5.4), percebe-se que na faixa de capilaridade onde a curva da massa perdida ainda não está assintotizada, o crescimento (inclinação) da curva é mais pronunciado para o escoamento no meio poroso (A). Este comportamento da curva mostra que a estabilização da recuperação de massa se dá em condições de escoamento com menor número de capilaridade, quando comparado aos escoamentos nos meios porosos (B) e (C). Significa dizer que para meios porosos que possuem menor diâmetro médio de esferas em sua constituição, há a tendência de menor recuperação de massa do interior do leito poroso. Este fenômeno é esperado, pois meios porosos constituídos por menor diâmetro médio de esferas possuem também poros de dimensões reduzidas, oferecendo maior resistência ao deslocamento do fluido contido em seu interior. Desta forma, a recuperação gás-líquido é dificultada, obtendo para estes meios porosos menor eficiência

de varredura.

Na Figura (5.4) ainda faz-se uma comparação das curvas da massa perdida obtidas por este estudo experimental para o deslocamento em meios porosos com a curva obtida no trabalho também experimental de Taylor [20] em tubo capilar.

Nas curvas da massa perdida obtidas nos dois estudos, percebe-se a mesma tendência para a assintotização, porém nota-se uma evidente diferença quantitativa na massa perdida em função do número de capilaridade. Na análise experimental do presente estudo, a curva da massa perdida para qualquer meio, assintotiza em um valor muito pequeno de número de capilaridade, quando comparado ao trabalho de Taylor [20].

Ainda na comparação com o trabalho de Taylor [20], Figura (5.4), percebe-se que para uma mesma condição de escoamento, ou seja, para idênticos números de capilaridade, a recuperação de massa líquida do interior de tubos capilares é muito maior do que em meios porosos, esta diferença se torna evidente pelas características dos deslocamentos. Em tubos capilares, o deslocamento do líquido pelo gás se dá em caminho único e com menor resistência à sua passagem. Diferentemente, em meios porosos o deslocamento se dá com a possibilidade de formação de caminhos preferenciais, influenciando o fator de recuperação. O parâmetro que quantifica esta diferença de recuperação de massa entre os dois deslocamentos é a eficiência de varredura.

No estudo de Taylor [20], o deslocamento é obtido com 100% de varredura e a curva de massa perdida assintotiza para um valor de aproximadamente 0,6. Para estabelecer um paralelo, para os meios porosos (A), (B) e (C) onde a curva da massa perdida assintotiza para valores aproximados de 0,90, 0,85 e 0,80, a eficiência de varredura é de

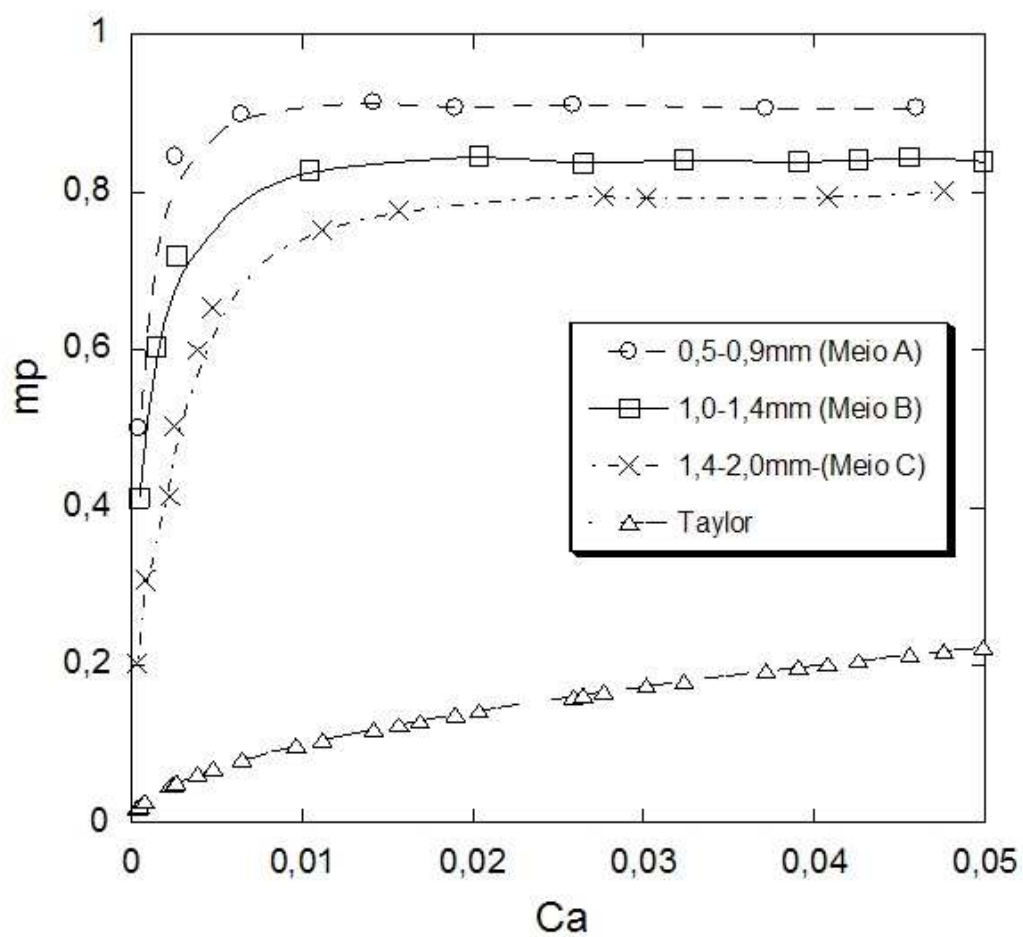


Figura 5.4: Comparação das curvas da massa perdida obtidas nos escoamentos dos meios porosos

(A), (B) e (C) com a curva obtida por Taylor [20] em tubo capilar.

66, 7%, 70, 6% e 75%, respectivamente.

Nas curvas da massa perdida obtidas por esta análise experimental, nota-se uma variação significativa da massa perdida dentro da faixa de capilaridade de 0 a 0,01, para qualquer um dos meios porosos. Desta forma, a reprodução prática dessa ordem de grandeza de capilaridade para escoamentos em meios porosos com diâmetros médios de partículas próximos aos do presente estudo, sugere uma variação considerável da massa recuperada e, desta forma, podendo-se obter aumentos significativos no fator de recuperação.

Capítulo 6

Comentários Finais

O presente estudo trata de uma análise experimental do deslocamento de líquidos do interior de meios porosos artificiais pela injeção de gás. O meio poroso é montado com auxílio de esferas de vidro transparentes e o gás utilizado para o deslocamento é o nitrogênio. O líquido recuperado é uma mistura de água e PEG, Polietileno Glicol. Os experimentos tratam de deslocamentos quase estáticos entre dois fluidos, um gás e um líquido. A montagem experimental é projetada em acrílico, permitindo a visualização do deslocamento para conclusões qualitativas dos fenômenos recorrentes para este tipo de escoamento. Para todos os deslocamentos, faz-se a análise da influência do número de capilaridade e do diâmetro médio das esferas que constituem o meio na curva da massa perdida. É feito um paralelo entre as curvas da massa perdida obtidas pelo presente trabalho experimental com o trabalho também experimental de Taylor [20] em tubos capilares.

Tanto a curva da massa perdida obtida neste estudo quanto a curva obtida pelo

trabalho de Taylor [20] demonstra a mesma tendência à assintotização e, desta forma, sugere que o número de capilaridade é, assim como nos tubos capilares, o parâmetro governante do escoamento em meios porosos. Esta similaridade de comportamento entre as curvas é compreendida pelo fato de meios porosos serem constituídos por poros de dimensões capilares que servem de caminhos de deslocamento do fluido pelo gás injetado. As curvas da massa perdida para este estudo assintotizam para um baixo valor do número de capilaridade, quando comparado ao estudo de Taylor e a quantidade de massa perdida para este estudo experimental é significativamente maior que no trabalho capilar de Taylor [20] devido a menor eficiência de varredura para o escoamento em meios porosos.

Os resultados ainda mostram a influência do diâmetro médio das esferas que constituem o meio poroso. Percebe-se que quanto menor o diâmetro médio das esferas, menor é a recuperação de massa no interior do meio poroso. Em outras palavras, a recuperação de massa para estes meios possui menor fator de recuperação e eficiência de varredura, quando comparado ao deslocamento nos meios porosos constituídos com maiores diâmetros médios.

Para futuras análises experimentais em meios porosos, sugere-se a recuperação de fluidos viscosos a partir da injeção de gás pulsado. A injeção pulsada está relacionada a geração de ondas de choque no interior do meio poroso, formando maior quantidade de frentes de gás ("fingers") com maior eficiência de varredura, recuperando maior quantidade de massa líquida e, conseqüentemente, obtendo maior fator de recuperação. Recomenda-se a injeção do gás pulsado de duas formas distintas. A primeira, injetar gás pulsado desde o início do deslocamento e a segunda, pulsar o gás após o mesmo ter atra-

vessado o meio poroso, observando se novos caminhos serão gerados, recuperando uma massa adicional líquida.

Ainda para análises futuras, sugere-se investigar a influência da distribuição em frequência dos diâmetros das esferas que constituem o meio na recuperação da massa líquida. No presente estudo, esta distribuição serve como um dado informativo para a caracterização dos meios porosos. Para esta investigação, deve-se alterar a distribuição em frequência dos diâmetros das esferas, mantendo o diâmetro médio e, assim, analisar o comportamento da curva da massa perdida. Pode-se explorar também novas faixas de diâmetros de esferas tanto maiores e menores quanto possível e investigar a tendência de comportamento da curva da massa perdida em função do número de capilaridade.

A distribuição espacial não analisada no presente estudo pode ser investigada em trabalhos futuros com a montagem de meios porosos em camadas estratificadas com diâmetros distintos de esferas, analisando a recuperação da massa em função do número de capilaridade do escoamento e uma eventual comparação pode ser realizada com o presente estudo.

Outra sugestão para trabalhos futuros seria a injeção de gás para recuperação da massa líquida de fluidos não newtonianos, analisar parâmetros reológicos e efetuar uma comparação com o trabalho aqui desenvolvido. Ainda sugere-se investigar a influência da capilaridade na curva da massa perdida para uma combinação de deslocamentos entre fluidos newtonianos e não newtonianos.

Em suma, diversas possibilidades da investigação da influência do número de capilaridade na curva da massa perdida em meios porosos, em análises experimentais,

podem ser exploradas para conhecimentos mais detalhados dos fenômenos que ocorrem neste tipo de deslocamento.

Referências Bibliográficas

- 1 E. C. Abreu, *Desenvolvimento de novas estratégias para recuperação avançada de hidrocarbonetos em reservatórios de petróleo*, Prêmio Petrobras de Tecnologia, Primeiro Lugar na Categoria Recuperação de Petróleo (2005).
- 2 A. T. Chwang and A. T. Chan, *Interaction between porous media and wave motion*, J. Fluid. Mech. **30** (1998), 53–84.
- 3 B. G. Cox, *On driving a viscous fluid out of a tube*, J. Fluid Mechanics **14** (1962), 81–96.
- 4 Y. Dimakopoulos and J. Tsamopoulos, *Transient displacement of a viscoplastic material by air in straight and constricted tubes*, J. Non-Newt. fluid Mech **112** (2003), 43–75.
- 5 F. A. L. Dullien, *Porous media: fluid transport and pore structure, 2nd ed.*, Academic Press Limited, London, 1979.
- 6 F. Fairbrother and A. E. Stubbs, J. Chem. Soc. **1** (1935), 527.

- 7 O. Fergui, H. Bertin, and M. Quintard, *Transient aqueous foam flow in porous media: experiments and modeling*, Journal of Petroleum Science and Engineering **20** (1998), 9–29.
- 8 F. Friedmann, W. H. Chen, and P. A. Gauglitz, *Experimental and simulation study of high-temperature foam in porous media*, Soc. Petrol. Eng. **6** (1991), 37–45.
- 9 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 and Engineering **29** (2001), 53–65.
- 10 B. T. Hoffman and A. R. Kavscek, *Displacement front stability of steam injection into high porosity diatomite rock*, Journal of Petroleum Science and Engineering **46** (2005), 253–266.
- 11 P. C. Hozyak and K. W. Koelling, *Peneration of a long bubble through a viscoelastic fluid in a tube*, J. Non-Newt. Fluid Mech. **71** (1997), 73–88.
- 12 M. Jamialahmadi, H. Muller-Steinhagen, and M. R. Izadpanah, *Pressure drop hold-up and heat transfer during single and two-phase flow through porous media*, International Journal of Heat and Fluid Flow **26** (2005), 156–172.
- 13 R. T. Johansen, *Overview of selected oil recovery processes*, Journal of Rheology **23(2)** (1979), 167–179.
- 14 F. Kamisli, *Free coating of a non-newtonian liquid onto walls of a vertical and inclined tube*, J. Chem. Soc. **42** (2003), 569–581.

- 15 F. Kamisli and M. E. Ryan, *Perturbation metod in gas assisted power-law fluid displacement in a circular tube and retangular channel*, Chemical Engineering Journal **42** (2003), 569–581.
- 16 A. R. Kovscek and H. J. Bertin, *Foam mobility in heterogeneous porous media*, Transport in Porous Media **52** (2003), 17–35.
- 17 J. Moghadasi, H. Muller-Steinhagen, M. Jamialahmadi, and A. Sharif, *Theoretical and experimental study of particle movement and deposition in porous media during water injection*, Journal of Petroleum Science and Engineering **43** (2004), 163–181.
- 18 A.J. Poslinsky, P.O. Oehler, and V.K. Stokes, *Isothermal gas assisted displacement of a viscoplastic liquids in tubes*, Polimer engeneering and Science **35** (1995), 877–892, MID-JUNE.
- 19 E.J. Soares, M. S. Carvalho, and P. R. Souza Mendes, *Gas displacement of non-newtonian fluids in a tube*, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (2001), 11–16.
- 20 G.I. Taylor, *Deposition of a viscous fluid on the wall a tube*, J. Fluid Mechanics **10** (1960), 161–165.